MÄRZ 2004 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

www.spektrum.de

PHYSIK

Zersplitterte Raum-Zeit

Loop-Quantengravitation – eine neue Theorie zur Vereinigung aller Naturkräfte

KLIMA

Rasante Erwärmung der Arktis

FAIRNESS

Mathematik der Gerechtigkeit

TROPENKRANKHEITEN

Evolution der Malaria



D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,– €



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Die Zukunft der Menschheit

Wie wird die Welt im Jahre 2050 aussehen? Klimatisch sprechen viele Anzeichen für globale Erwärmung. In der Schweiz beispielsweise sind die Gletscher in den letzten zwei Jahren so stark geschmolzen wie noch nie zuvor. Und wie rapide derzeit das Eis der Arktis schrumpft, zeigten die Bilder in unserem Dezember-Heft (S. 13). Auch Permafrost-Regionen beginnen aufzutauen, Vegetationszeiten nehmen zu – dies alles mit noch unabsehbaren Folgen für die kommenden Jahrzehnte, wie ein Team US-amerikanischer Klimatologen ab Seite 26 berichtet. Die WHO hat kürzlich die Zahl der Opfer bilanziert, die allein dem Klimawandel zuzurechnen sind (»Climate Change and Human Health – Risks and Responses«). Demnach wären es im Jahr 2000 rund 150 000 Tote gewesen.

Nicht minder dramatisch weisen andere Indikatoren in eine veränderte Zukunft des Planeten. Eine internationale Gruppe von Botanikern und Zoologen prognostizierte im Januar das Aussterben von 15 bis 37 Prozent aller Arten bis zum Jahre 2050 (»Nature« 427, S. 145). Je nach Erwärmungsszenario könnte bis dahin sogar eine Million Tier- und Pflanzenarten unwiderruflich verloren gehen.

Die Sorge um eine nahe und bedrohte Zukunft, die ja die Jüngeren noch alle erleben werden, scheint um sich zu greifen. So beschäftigte sich Ende letzten Jahres auch das Fachblatt »Science« in einer mehrteiligen Serie mit »den nächsten fünfzig Jahren«. Alle Forscher rechnen bis dahin mit einer Weltbevölkerung zwischen 8 und 10 Milliarden Menschen, die dann vorwiegend in gigantischen Städten siedeln und deren Altersdurchschnitt bis dahin dramatisch ansteigt. Unter den kritischen Faktoren für die Menschheit – Gesundheit, Nahrung, Frischwasser, Energie, globale Luftqualität und Umweltverschmutzung, Artenvielfalt, Klima – ist keiner, der nicht bedroht ist oder dessen Zustand nicht bestenfalls als unsicher gilt. Überausbeutung durch dramatisches Bevölkerungswachstum gefährdet unsere Lebensgrundlage – ist unser Untergang unausweichlich?

»Kein Forscher will im Raubbau unserer Ressourcen nur die drohende Apokalypse sehen«

Verblüffenderweise will keiner der Forscher in alledem nur die drohende Apokalypse sehen. Vielmehr äußern sie »mit vorsichtigem Optimismus«, dass die Erfahrung der letzten Jahre Wege aufgezeigt habe, sich kommenden Krisenzeiten anzupassen – »wenn auch nicht ohne Mühe«. Für diese Anstrengung haben Wissenschaft und Technik mittlerweile einiges zu bieten – etwa bei der Eindämmung der Treibhausgase, in der Agrar- und Lebensmitteltechnik, in der Epidemiologie, für die Familienplanung, bei der Sicherung von Ökosystemen oder der Entwicklung nachhaltiger Lebensstile.

So zeigen diese Studien, dass die Wissenschaft heute durchaus über Ansätze zu einem flexiblen und adaptiven Umgang mit an sich apokalyptischen Trends verfügt. Das Jahr 2050 muss nicht zum Jahr des Untergangs werden.

MÄRZ 2004

SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Körnig, wie symbolisch bei diesem Menschen dargestellt, wird die Raumzeit bei extrem hoher Auflösung – ein Effekt der Quantengravitation

Bild: Kenn Brown



SEITE 26

GEOLOGIE

Ist die Arktis bald eisfrei?

Meereis und Gletscher schwinden, Permafrostböden tauen auf, und die Vegetationsperiode verlängert sich: Die globale Erwärmung hinterlässt unübersehbare – und höchst beunruhigende – Spuren in der Arktis

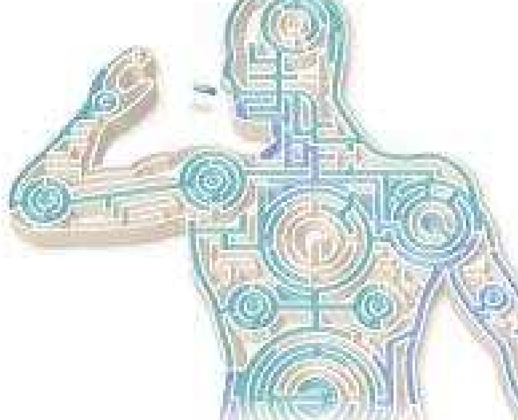


SEITE 34

NEUTRONENSTERNE

Ultradichte Exoten

Die extremen Bedingungen im Inneren dieser kompakten Himmelskörper sorgen dafür, dass Sterne selbst nach ihrem explosiven Ende ein außergewöhnliches Dasein führen



SEITE 42

PHARMATECHNOLOGIE

Medikamente direkt zum Ziel

Die Suche nach günstigeren Eingangspforten für Medikamente ist weit fortgeschritten. Davon profitieren besonders die biotechnologisch entwickelten Wirkstoffe

SEITE 64

AGGRESSION

Prinz Kropotkin

Hat der Mensch einen natürlichen Hang zum Bösen, der sich nur durch soziale Zwänge notdürftig im Zaum halten lässt?



SEITE 68

UNSICHTBARES GENOM II

DNA ist nicht alles

Nicht nur auf den Inhalt, auch auf die Verpackung kommt es an. Wie die Dekoration der DNA Vererbung, Entwicklung und Gesundheit beeinflusst, wollen Forscher nun im Human-Epigenomprojekt ergründen


SEITE 54

TITELTHEMA QUANTENGRAVITATION

Zersplitterte Raumzeit

Eine neuartige Theorie greift nach dem Gral der Physik: Die »Loop-Quantengravitation« wagt die Vereinigung von Quantenmechanik und Gravitation



3-D-DISPLAYS

Als wär´s zum Greifen nah

SEITE 76

Ein bisschen magisch ist es schon, wenn der zweidimensionale Computer- oder Fernsehbildschirm ein Fenster in die räumliche Welt öffnet

SEITE 82

SEUCHEN

Der Ursprung der Malaria

Die verheerende Malaria tropica entstand durch Ackerbau in den afrikanischen Tropen. In ihren Kerngebieten lässt sie sich mit bekannten Methoden nicht besiegen

SEITE 90

FAIRNESS

Die Mathematik der fairen Zuteilung

Gerechtigkeit für viele muss im Prinzip dasselbe sein wie Gerechtigkeit für zwei. Dieser Grundsatz, in eine mathematische Form gebracht, hilft in vielen Fällen, befriedigende Lösungen zu finden

M Ä R Z 2 0 0 4

REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

KOMMENTARE

WISSENSCHAFT IM ...

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN



Zwischen virtuell und real

Kann der Ausflug in virtuelle Welten bei Menschen mit instabiler Orientierung Bewusstseinsstörungen auslösen?

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Die Ökonomie der Kinderarbeit

Januar 2004

Der Artikel erzeugte bei mir Betroffenheit, ist er doch auf eine beklemmende Art für unsere globalisierte Gesellschaft sehr aktuell. Der Autor schildert, dass Kinderarbeit in vielen Märkten durch das von ihm erläuterte »Multiple Marktgleichgewicht« überwunden werden kann. Dabei streift er die Auswirkungen auf Arbeitgeber nur am Rande. Hier liegt aber ein wesentliches Problem. Das vom Autor angestrebte Gleichgewicht bei höheren Löhnen bedeutet für den Arbeitgeber, dass er seine Produkte zu höheren Preisen anbieten muss. Das kann er aber nur, wenn praktisch alle Anbieter gleichzeitig diesen Schritt tun – in einer globalisierten Welt heißt das, dass de facto weltweit alle Arbeitgeber einer bestimmten Branche gleichzeitig auf Kinderarbeit verzichten müssten. Das ist ein eher unwahrscheinliches Szenario.

Zu beobachten ist eher der umgekehrte Trend. Gerade in den USA sind Anstellungen zu Niedrigstlöhnen, die nicht ausreichen, das Existenzminimum zu sichern, oft anzutreffen, sodass viele Menschen gezwungen sind, mehr als einen Job anzunehmen. Westliche Länder, nicht zuletzt Deutschland, versuchen mit ähnlichen Maßnahmen ihre Arbeitslosenproblematik zu lösen. Darunter leiden insbesondere allein erziehende Mütter, die sich gezwungen sehen, ihre Kinder über viele Stunden unbeaufsichtigt zu lassen.

Nach den Darlegungen des Autors führen aber Löhne unterhalb des Existenzminimums zu einem »Niedriglohn-Gleichgewicht« und schaffen damit Anreize auch in unseren westlichen Industrienationen, die Kinderarbeit wieder einzuführen. Allerdings wären die Kinder dann wenigstens wieder beaufsichtigt.

Werner Brinker, Darmstadt

Sicherungen

Wissenschaft im Alltag
Januar 2004

Dass »ein Opfer ein Strom führendes Teil nicht mehr loslassen kann«, passiert bei Gleichspannung, nicht aber bei Wechselspannung wie aus der häuslichen Steckdose, da dort der Strom hundertmal in der Sekunde die Richtung ändert und dazwischen immer wieder auf null fällt. Auch deswegen wurden die zunächst eingerichteten Gleichstromnetze auf Wechselstrom umgestellt. Das analoge Telefonnetz benutzt meines Wissens die höchste in allgemein zugänglichen Geräten zulässige Gleichspannung von sechzig Volt. Höhere Gleichspannungen (zum Beispiel sechshundert Volt) findet man bei Straßen- und U-Bahnen, und dort gilt in der Tat: Leitungen nicht anfassen!

Thomas Becker, Bremen

Antwort des Notfallmediziners Anton Lafenthaler:
Eine Nervenzelle ist nicht vergleichbar mit einem elektrischen Leiter im technischen Sinne, denn die elektrische Fortleitung basiert auf einer Elektrolytverschiebung zwischen dem Zellinneren und -äußeren. Damit die Zelle wieder einen Stromimpuls leiten kann, benötigt sie eine gewisse Erholungszeit (Refraktärzeit). Deshalb hilft der Wechsel der Polung bei ausreichendem Stromfluss nicht gegen die Muskelkontraktion. So werden in der Anästhesie Stimulationsgeräte verwendet, die Stromimpulse mit einstellbarer Frequenz abgeben, auch fünfzig pro Sekunde. Dabei ist eine Muskelkontraktion problemlos auszulösen.

Schlaf lässt sich leicht erkennen, ist aber nur schwer exakt zu definieren.

CORBIS

Warum schlafen wir?

Januar 2004

Die Frage nach dem »Warum« lässt sich eigentlich sehr einfach beantworten: Das Gehirn verarbeitet die eintreffenden Sinnessignale zu passenden Reaktionen auf die Umwelt. Der Helligkeits-/Gesichtssinn als wohl wesentlichster Teil der Sinneseindrücke ist aber seit Beginn des tierischen Lebens auf eine der beiden Hälften des Tages beschränkt und liefert in der anderen Hälfte kaum brauchbare Signale. Außerdem sind selbst sehr einfache Gehirne in der Lage, gewisse Lernprozesse zu bewältigen, mit steigender Fähigkeit bei steigender Komplexität.

Neue Erfahrungen passend in das Aktionsschema eines Steuerungssystems einzubauen erfordert aber Rechenkapazität und Probeläufe. Nichts läge einem Techniker näher, als für diesen Prozess die Leerlaufzeit des Gesamtsystems zu nutzen. Auf den Trick ist die Evolution bereits sehr viel früher gekommen: In der »sinnesleeren« Phase des Tages wird der Körper einfach von der Steuerung abgekoppelt, die nun ohne Leistungsverlust die Lernphase und Probeläufe (=REM-Phase des Schlafes (?)) durchführt.

Fasst man den Schlaf also als natürliches Designprinzip auf, so drehen sich die ganzen Untersuchungen nicht um das »Warum«, sondern darum, wie das Designprinzip umgesetzt wird. Dabei kann man durchaus auch Anleihen bei anderen Fachgebieten machen. Phänomene wie ein Systemzusammenbruch bei Schlafmangel finden durchaus ihre Parallelen bei dynamischen neuronalen Netzwerken, dem wohl dem Gehirn derzeit ähnlichsten technischen Modell, das aber bezüglich echter Dynamik auch noch relativ in den Anfängen steckt.

Prof. Gilbert Brands, Krummhörn

Hormon-Irrweg verlassen

Forschung und Gesellschaft
November 2004

Statistik ist ein Spezialgebiet innerhalb der mathematischen Wissenschaften. Autofahren würde weniger lustvoll erlebt, würde man der Bevölkerung einmal die statistischen Risiken (Todesfälle/Querschnittlähmungen) dieses bequemen Fortbewegungsmittels genauer vor Augen halten. Ich meine, dass Ihr Artikel etwas zu weit weg von der täglichen Praxis mit ihren realen Problemen kreiert wurde.

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126 729

Ich selbst bin Neuroophthalmologe und nicht Gynäkologe. Aber ich führe regelmäßig Medikamentenanamnesen durch und habe daher einen kleinen Einblick in die Realität der Hormonsubstitution. Diese sieht weniger düster aus, als Ihr Artikel vermuten lässt. Von einem Hormon-Irrweg kann daher noch lange nicht gesprochen werden. Ein solcher Titel sollte meines Erachtens in einer wissenschaftlichen Zeitschrift vermieden werden, da er doch einen zu polemischen Ton vermittelt und damit mehr an die Gefühle als an die Sachlichkeit appelliert. Genau das sollte ja die Wissenschaft vermeiden.

PD Dr. med. H. E. Killer, Aarau, Schweiz

Auch Affen können beleidigt sein

Forschung aktuell, Januar 2004

Der Autor stellt in diesem Beitrag das evolutionär vorteilhafte (positive) Verhalten des Fairnessgefühls bei Kapuzineräffchen dar. Seltsamerweise benützt er dieses Thema, um in seinem Schlusssatz, fälschlicherweise Fairnessgefühl mit Neid gleichstellend, Frauen einen biologisch bedingten Hang zum (negativen) Letzeren zu unterstellen.

Auch Frauen können beleidigt sein – angesichts solcher unfairen Schlussfolgerungen.

Adrienn Cserno, Ulm

Der zwiespältige Erfolg der Brüder Wright

Januar 2004

Sie schmälern die Leistung von Wilbur und Orville Wright, indem Sie unterstellen, »Scientific American« hätte natürlich über die Wright-Brüder geschrieben, wenn diese sich nur etwas geschickter verhalten hätten.

Die Spitzen der amerikanischen Wissenschaft waren zum Zeitpunkt des Erstflugs der Gebrüder Wright schon gescheitert oder der Ansicht, dass Flugmaschinen auf Grund physikalischer Gegebenheiten über eine bestimmte Größe nicht hinauskommen könnten. Warum sollte das wissenschaftliche Amerika von zwei Fahrradmechanikern, die behaupteten, sie könnten fliegen, Notiz nehmen?

Andere begannen, hemmungslos den Wright-Flyer zu kopieren. Man muss sich folgende Situation einmal vorstellen: Orville Wright musste für ein eventuelles Geschäft mit dem Staat einen Gutachter akzeptieren, der einer privaten Gesellschaft angehörte, die den Wright-Flyer einfach nachbaute!



Zunächst erprobten die Brüder Wright einfache Fluggeräte.

M. FREUNDL. GEN. DER SPECIAL COLLECTIONS A. ARCHIVES, WRIGHT STATE UNIV.

Die Methoden der Brüder Wright waren wissenschaftlich, wo andere nur herumprobierten. Darum ihr großartiger Erfolg. Ihr Name wird nicht vergessen werden, solange es Menschen gibt.

Franz Hinterplattner, Salzburg

Errata:

Wie wählt man eine Fußballmannschaft?

Mathematische Unterhaltungen
Januar 2004

Das dritte Bild im Text (S. 100, dritte Spalte) ist versehentlich falsch beschriftet worden. Die Texte »1. Wahl« und »2. Wahl« sind zu vertauschen, desgleichen die Nummern 2 und 3 in der linken (A-)Spalte: Die Präferenzfolge für A ist nach wie vor 1, 2, 3, 4.

Sicherungen

Wissenschaft im Alltag
Januar 2004

Bei Niederspannungsunfällen (bis 600 Volt) ist nicht der Herzinfarkt die Gefahr, sondern eine als Kammerflimmern bezeichnete Herzrhythmusstörung, bei der der Kreislauf zusammenbricht.

Die Redaktion

Spektrum DER WISSENSCHAFT
Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126 711, Fax 06221 9126 729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126 600, Fax 06221 9126 751
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. 0211 908 3357, Fax 0211 908 3358, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126 733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126 741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126 744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Bernhard Epping, Dr. Markus Fischer, Stéphanie Gier, Andrea Jungbauer, Dr. Susanne Lipps-Breda, Prof. Dr. Friedrich Pukelsheim, Nadja Schmidt, SciTech Italia S.r. 1, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126 743, E-Mail: marketing@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. 06201 6061 50, Fax 06201 6061 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)

Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. 0211 88723 79, Fax 0211 88723 99; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723 76, Fax 0211 3749 55
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686150, Fax 030 6159005, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Detlef Cölln, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183/-183/ -193, Fax 040 339090; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 30135 2060, Fax 0211 133974; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Klaus Haroth, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424 4536, Fax 069 2424 4555; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, D-70173 Stuttgart, Tel. 0711 22475 40, Fax 0711 22475 49; München: Bernd Schwetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. 089 545907 14, Fax 089 545907 16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2387, Fax 0211 374955

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 25 vom 01.01.2004.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

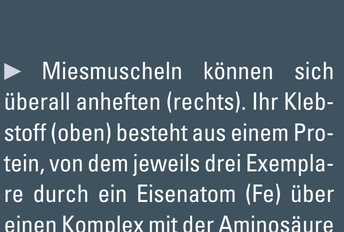
ISSN 0170-2971

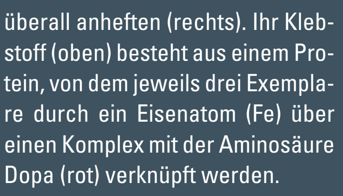
SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President and International Manager: Dean Sanderson

CHEMIE

Der Superkleber der Miesmuschel

Rankenfußkrebse und Muscheln sind eine stete Plage für den Seefahrer. Sie setzen sich in Massen an Schiffsrümpfen fest, wodurch des Skippers Stolz einerseits Schaden erleidet und andererseits erheblich an Geschwindigkeit einbüßt. Forscher zerbrechen sich schon lange den Kopf darüber, wie dieser Bewuchs – das so genannte Fouling – verhindert werden könnte. Nun lüftete das Team um Jonathan J. Wilker von der Purdue-Universität in West Lafayette (Indiana) zumindest das Geheimnis des Superklebers von Miesmuscheln. Demnach scheiden die Tiere ein spezielles Protein ab, mit dem sie sich auf praktisch jeder Oberfläche festsetzen können – sogar auf Teflon. Die US-Forscher fanden heraus, dass für die Klebwirkung ausgerechnet die Aminosäure 3,4-Dihydroxyphenylalanin (Dopa) sorgt – dieselbe Substanz, die in der Medizin zur Behandlung der Schüttellähmung (Parkinson-Erkrankung) dient. Jeweils drei Dopa-Gruppen werden durch ein dreiwertiges Eisen-Ion in einen oktaedrischen Komplex eingebunden und so miteinander verknüpft. Auf diese Weise bilden die Proteine untereinander ein ausgedehntes, stabiles Netzwerk. Das Eisen holt sich die Muschel einfach aus dem Meerwasser. *(Angewandte Chemie, 16.1.2004, S. 454)*





▶ Miesmuscheln können sich überall anheften (rechts). Ihr Klebstoff (oben) besteht aus einem Protein, von dem jeweils drei Exemplare durch ein Eisenatom (Fe) über einen Komplex mit der Aminosäure Dopa (rot) verknüpft werden.

ASTRONOMIE

Planet wärmt Sonne

Dass Sterne ihre Planeten aufheizen können, versteht sich von selbst – schließlich herrschen nur deshalb auf der Erde angenehme Temperaturen. Doch erstaunlicherweise geht es auch andersherum. Auf einen solchen Fall stießen kürzlich Evgenya Shkolnik und ihre Kollegen an der Universität von British Columbia in Vancouver (Kanada). Ihr Untersuchungsobjekt war der sonnenähnliche Stern HD 179949, der neunzig Lichtjahre von der Erde entfernt im Sternbild Schütze liegt. Dicht um ihn kreist, wie seit einiger Zeit bekannt ist, ein Planet von etwa Jupiter-Größe und mindestens 270 Erdmassen. Der Riese ist mit 560 000 Kilometern pro Stunde recht zügig unterwegs und braucht nur drei Tage für einen Umlauf um seinen Mutterstern. Als die kanadischen Forscher HD 179949 im ultravioletten Licht betrachteten, machten sie eine über-raschende Entdeckung.

Auf seiner Oberfläche – genauer: in der Chromosphäre – gibt es so genannte Hot Spots: heiße Gebiete, die wärmer sind als ihre Umgebung und durch Magnetstürme hervorgerufen werden. Einer von ihnen wandert auf dem Stern entlang und hält unverkennbar Schritt mit dem umlaufenden Trabanten, als wäre er dessen Schatten. Am plausibelsten lässt sich das Phänomen dadurch erklären, dass der Planet – wie die Erde – über ein eigenes Magnetfeld verfügt, mit dem er zusätzliche Magnetstürme auf HD 179949 entfacht und so für eine Extraportion Hitze auf dessen Oberfläche sorgt. *(Pressemitteilung der Universität von British Columbia in Vancouver, Kanada)*

▲ Ein Planet mit eigenem Magnetfeld (oben) ruft gewaltige Magnetstürme auf dem Stern HD 179949 hervor (Detail links) und heizt ihn dadurch punktuell auf.

BEIDE ABBILDUNGEN: SOHO / ESA / NASA

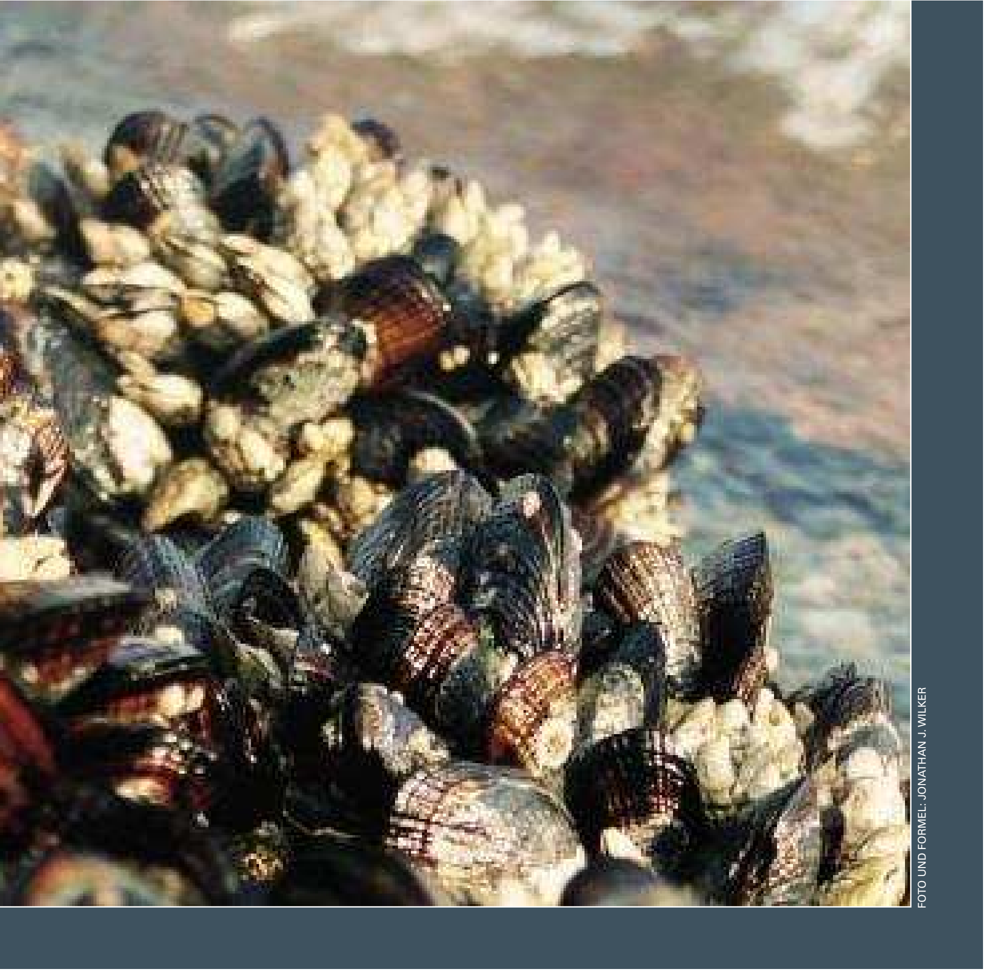


FOTO UND FORMEL: JONATHAN J. WILKER

PHYSIOLOGIE

Kräftezehrender Beinschwung

Tanzen macht Spaß, aber ist es auch gut dazu, ein paar überflüssige Pfunde loszuwerden? Wer lediglich mit den Gliedmaßen schlenkert, macht nicht unbedingt den Eindruck, dabei viele Kalorien zu verbrauchen. Doch der Schein trügt. Richard L. Marsh und seine Kollegen an der Northeastern University in Boston gingen der Frage nach, wie viel Energie beim Laufen zum Vorwärtsschwingen der Beine benötigt wird. Dazu ließen sie Perlhühner mit verschiedenen Geschwindigkeiten rennen und maßen jeweils das Durchblutungsmuster der Beine. Daraus konnten sie auf den Energieumsatz der einzelnen Muskelgruppen in Abhängigkeit vom Bewegungstempo schließen.

Überraschendes Ergebnis: Immerhin ein Viertel der Arbeit beim Laufen wenden die Perlhühner für das scheinbar mühelose Schwingen der Beine auf; die restlichen drei Viertel dienen zum Abfedern des Körpergewichts, zum Beschleunigen und für andere Aktivitäten, während der Fuß den Boden berührt. Dieses Verhältnis gilt sowohl beim gemächlichen Trippeln als auch beim rasanten Sprint, ist also unabhängig von der Geschwindigkeit. Demnach kann der Discobesuch durchaus der Figur zugute kommen, auch wenn er im Fitnesswert nicht an das Jogging heranreicht. *(Science, 2.1. 2004, S. 82)*

▼ **Auch das bloße Vorwärtsschwingen des Beins beim Laufen kostet das Perlhuhn überraschend viel Kraft.**

RICHARD MARSH



PSYCHOLOGIE

Karriere nach Noten

Wer als Schüler glänzt, bringt es meist auch im Berufsleben weit.

ZEFA

Viele Schüler und Studenten werden wenig begeistert von diesem Forschungsergebnis sein. Psychologen um Nathan R. Kuncel an der Universität von Illinois in Urbana-Champaign haben belegt: Wer das Zeug zum guten Schüler hat, wird es wahrscheinlich auch im Berufsleben weit bringen. Die geistigen Fähigkeiten, die den Erfolg im Klassenzimmer ausmachen, sind offenbar die gleichen, die auch helfen, später die Karriereleiter zu erklimmen. Das erwies eine Metastudie über 127 Untersuchungen an insgesamt 20000 Personen. Demnach lässt sich, wie der britische Psychologe Charles Spearman schon vor einem Jahrhundert behauptete, bei jedem Menschen eine »allgemeine kognitive Fähigkeit« *g* ermitteln, die ein Maß für seine generelle Intelligenz darstellt. Je höher nun der Wert von *g*, desto erfolgreicher ist der entsprechende Mensch – sowohl auf schulisch-akademischer als auch auf beruflicher Ebene. »Streng dich an für gute Noten, du willst doch mal was werden« – Eltern haben künftig einen Grund mehr, diesen Satz zu äußern. Zum Leidwesen ihrer Kinder. *(Journal of Personality and Social Psychology, Nr. 86, S. 148)*

ERNÄHRUNG

Geborene Säufer leben länger

Mit diesem Ergebnis hatten sie vermutlich nicht gerechnet. Wissenschaftler um Maija Sarviharju vom Institut für öffentliche Gesundheit in Helsinki (Finnland) wollten die schädlichen Auswirkungen von chronischem Alkoholkonsum untersuchen. Dazu führten sie Experimente mit zwei speziellen Rattenstämmen durch: Einer war darauf gezüchtet, Alkohol zu meiden, der andere bestand aus geborenen Trinkern. Beide Tiergruppen wurden geteilt; je eine Hälfte bekam lebenslang ausschließlich zwölfprozentigen Alkohol zu trinken, die andere Hälfte nur Wasser.

Die Forscher beobachteten die Nager bis zu deren Tod und überwachten sie auf Krankheiten. Zu ihrer Verblüffung zeigte sich, dass der chronische Genuss von Alkohol die Lebensdauer der Tiere – gleich ob männlich oder weiblich, trinkfreudig oder abstinent – keineswegs verkürzte. Auch der Gesundheit schadete das permanente Besäufnis nicht. Mehr noch: Jene Ratten, die keinen Alkohol mochten, wurden viel häufiger krank und starben im Mittel früher als jene, die ein gutes Tröpfchen schätzten. Allerdings lassen sich die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf den Menschen übertragen, da die Nager den Alkohol zum Beispiel sehr viel schneller abbauen als wir. Trotzdem spekulieren die finnischen Forscher, dass Gene, die Alkoholismus begünstigen, einen bislang unbekannten Vorteil für Lebenserwartung und Gesundheit mit sich bringen könnten und deshalb im Laufe der Evolution nicht eliminiert wurden. *(Alcoholism: Clinical and Experimental Research, 1/2004, S. 93)*

DAVID SINCLAIR

▲ Die Alkohol liebende Ratte (rechts) ist gesünder und hat eine höhere Lebenserwartung als ihre abstinente Artgenossin (links).

ARCHÄOLOGIE

Siedler im eiszeitlichen Sibirien

Viel früher als bisher gedacht sind offenbar Menschen in die sibirische Arktis vorgedrungen. Russische Forscher entdeckten nördlich des Polarkreises am Mündungsdelta des Flusses Jana Siedlungsspuren, für die eine unkorrigierte Radiokarbondatierung ein Alter von rund 27 000 Jahren ergab. Berücksichtigt man die Schwankungen im Gehalt der Atmosphäre an radioaktivem Kohlenstoff-14, dürfte das tatsächliche Alter sogar noch höher sein und bei etwa 31 000 Jahren liegen. Damals hatte die letzte Eiszeit ihren Höhepunkt noch nicht erreicht. Anders als Europa oder Nordamerika blieb Sibirien allerdings weit gehend frei von ganzjährigen Inlandeisdecken.

Wie Pollenanalysen bestätigen, war das Fundgebiet eine mit Lärchen und Birken bestandene Tundrasteppe, in der zahlreiche Großtiere wie Mammuts, Wollnashörner, Bisons und Pferde lebten. Besonders auffällig unter den zahlreichen Stein- und Knochenartefakten sind aus Horn oder Elfenbein gearbeitete Speerschäfte, die denen der nordamerikanischen Clovis-Kultur stark ähneln. Dies könnte die in letzter Zeit bezweifelte Ansicht stützen, dass Amerika über die Beringstraße von Asien her besiedelt wurde. Allerdings sind die Clovis-Funde rund 16 000 Jahre jünger, und die Ähnlichkeit betrifft nur die Speerschäfte. Die an der Jana gefundenen Steinwerkzeuge unterscheiden sich stark von vergleichbaren Gerätschaften der Clovis-Menschen. *(Science, 2.1.2004, S. 33 und 52)*

VLADIMIR PETULKO ET AL., SCIENCE, BD. 303, S. 52

◀ Früheiszeitliche Steinwerkzeuge aus Sibirien, jeweils von beiden Seiten gezeigt

PHYSIK

Supraflüssiger Festkörper

Bei Temperaturen unter zwei Kelvin verliert Helium-4 seine Viskosität und verwandelt sich in eine Supraflüssigkeit, die widerstandslos fließt und sogar Gefäßwände hochkriecht. Letztlich ist dies die Folge einer so genannten Bose-Einstein-Kondensation der Gasatome in den energetisch niedrigsten Quantenzustand. Ein ähnlicher Phasenübergang sollte, so vermuten Theoretiker, auch dann stattfinden, wenn das Helium bei hohem Druck als Festkörper vorliegt.

Eunseong Kim und Moses H. W. Chan von der Pennsylvania State University in University Park haben diesen »suprafesten« Zustand jetzt möglicherweise erzeugt. Sie pressten das Helium-4 in poröses Glas und ließen eine Scheibe davon in einem Torsionsoszillator hin- und herschwingen. Ein Druck von 62 Bar stellte sicher, dass das Helium in den nanometergroßen Poren des Glases in kristallisierter Form vorlag. Unterhalb von 0,175 Kelvin zeigte sich ein Abfall der Schwingungsperiode, verursacht durch eine plötzliche Verringerung des Trägheitsmomentes der Scheibe.

Die wahrscheinlichste Erklärung dafür ist nach Ansicht der Forscher ein Übergang des Heliums in den suprafesten Zustand, in dem sich Leerstellen und Defekte im Kristallgitter frei bewegen können. Bei Kontrollversuchen mit Helium-3 blieb der Effekt erwartungsgemäß aus. Auch frühere Experimente mit freiem Helium-4 waren negativ verlaufen. Als Grund für den jetzigen Erfolg vermuten die Forscher, dass die Kondensation in den engen Glasporen viele Gitterdefekte verursacht. *(Nature, 15.1.2004, S. 225)*





BEIDE AUFNAHMEN: DLR / ESA

3-D-Ansichten vom Mars

Eine Armada von vier Raumsonden steuerte letzten Dezember den Mars an. Doch lediglich drei kamen an, darunter der europäische »Mars Express«. Auch er machte seinen Absendern freilich nur ein halbes Weihnachtsgeschenk: Der Orbiter erreichte zwar die vorgesehene Umlaufbahn, doch die Landeeinheit »Beagle 2« verschwand spurlos. So stahl die Nasa mit der gelungenen Landung und ersten Bildern von »Spirit« Anfang Januar den Europäern zunächst die Show. Doch dann wendete sich das Blatt: Während »Spirit« mit Problemen kämpfte, konnte die europäische Raumfahrtbehörde Esa mit eindrucksvollen 3-D-Bildern der Stereokamera an Bord des Orbiters und ersten wissenschaftlichen Ergebnissen aufwarten. So lieferte das Omega-Spektrometer zweifelsfreie Beweise für große Mengen Wassereis am Südpol. Zudem bestätigten Fotos wie die eines ausgetrockneten Flusslaufs mit bläulich erscheinenden Sedimenten (oben), dass einst flüssiges Wasser die Marsoberfläche gestaltete. Spektakulär ist auch der Schnappschuss eines Sturms (unten), der einen Staubvorhang in die dreißig Kilometer breite Caldera des Vulkans »Albor Tholus« weht.

ASTRONOMIE

Blick zurück ins dunkle Zeitalter

Das neue Apex-Teleskop in Chile soll einen weißen Fleck in der kosmischen Landkarte tilgen helfen. Indem es den Südhimmel im Submillimeterbereich durchmustert, verspricht es Einblicke in die Anfänge des Kosmos.

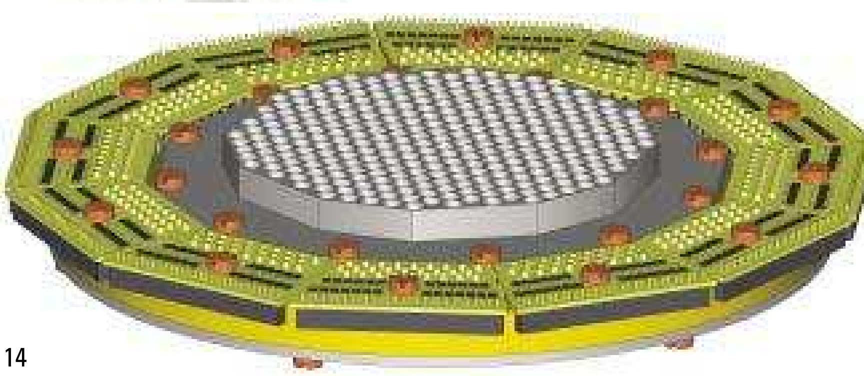
Von Olivia Meyer

Europäische Astronomen legen gerade letzte Hand an ein neuartiges Instrument in der chilenischen Atacama-Wüste. Mit ihm wollen sie Licht in jene Frühphase des Universums bringen, die als dunkles Zeitalter bekannt ist, weil noch kaum ein Stern das Universum erhellte. Dazu soll das so genannte Apex-Teleskop (»Atacama Pfadfinder Experiment«) den Südhimmel nach Quellen von Strahlung im Millimeter- und Submillimeterbereich absuchen. Denn in dieser bislang vernachlässigten Spektralregion verbergen sich faszinierende Informationen darüber, wie die ersten Sterne und die Galaxien entstanden sind.

Während Apex so ein neues Fenster ins All öffnet, erledigt es zugleich Vorarbeiten für ein noch leistungsfähigeres Instrument, das bereits in Planung ist: das »Atacama Large Millimeter Array« (Alma) – ein Interferometer aus 64 Radioantennen, das die entdeckten Submillimeter-Objekte dann ab 2009 im Detail untersuchen soll. Die Leitung des Apex-Projekts liegt in der Hand des Bonner Max-Planck-Instituts für Radioastronomie; beteiligt sind außerdem das Astronomische Institut der Ruhr-Universität Bochum, die Europäische Südsternwarte Eso und das schwedische Onsala-Observatorium (Oso). Beim späteren Alma-Interferometer, das etwa 500 Millionen Euro kostet, sind europäische und amerikanische Forschungsgruppen gleichberechtigte Partner.

Strahlung mit Wellenlängen im Bereich zwischen 295 Mikrometern und einem Millimeter wird vom Wasserdampf der Erdatmosphäre größtenteils absorbiert. Um sie mit irdischen Teleskopen nachweisen zu können, braucht man deshalb eine extrem trockene Atmosphäre, wie sie auf hohen Berggipfeln oder in der Antarktis herrscht. Nach einer fünf Jahre langen Messkampagne entschieden sich die Astronomen deshalb für die Atacama-Wüste in Chile als Standort für Apex und später Alma. Auf der gut 5000 Meter hohen Ebene um den Berg Chajnantor herrscht die Hälfte des Jahres über – abgesehen vom Südpol – die geringste Luftfeuchtigkeit weltweit.

Den Anstoß zum Bau des Apex-Teleskops gab Karl Menten, Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie. Er hatte die Idee, die Duisburger Firma »Vertex Antennentechnik«, die den Auftrag für einen der beiden Prototypen des Alma-Teleskops erhalten hatte, relativ kostengünstig gleich noch ein zweites Instrument bauen zu lassen. Wie die für Alma vorgesehenen Antennen hat das Apex-Teleskop einen Reflektor von zwölf Meter Durchmesser, der sich aus 24 identischen »Tortenstücken« zusammensetzt. Mit ausgeklügelten Designverfahren schaffte es der Hersteller, die aus 264 Aluminiumpaneelen gebildete Oberfläche so präzise zu gestalten, dass sie sich unter äußeren Einflüssen wie Wind, Temperaturänderung oder einseitiger Sonneneinstrahlung um höchstens 15 Mikrometer ändert – ein menschliches Haar ist dreißig bis fünfzig Mikrometer dick.



E. KREYSA, MPI FÜR RADIOASTRONOMIE, BONN

In dem Detektor »Laboca« (unten) konzentriert ein so genanntes Hornarray einfallende Strahlung mit 870 Mikrometer Wellenlänge auf 295 regelmäßig angeordnete Thermistoren.

Stellarer Babyboom

Eine ganze Palette astrophysikalischer Prozesse und Ereignisse lässt sich – fast ausschließlich – über die Submillimeterstrahlung erschließen. Einige Instrumente wie das 30-Meter-Teleskop des Instituts für Radioastronomie im Millimeterbereich (Iram) auf dem Pico Veleta in Spanien haben bereits Signale bei diesen Wellenlängen aus weit entfernten Galaxien empfangen. Die Astronomen führen sie auf so genannte Starbursts zurück: Phasen im Lebenslauf einer Galaxie, in denen sich plötzlich Unmengen von Sternen bilden. Dieses dramatische Geschehen ist nicht direkt beobachtbar, weil es sich im Inneren dichter Gas- und Staubwolken abspielt. Die ebenso intensive wie energiereiche Strahlung, die bei Starbursts vor allem im Ultraviolettbereich frei wird, kann deshalb nicht entweichen. Sie heizt aber den interstellaren Staub auf, und der gibt die aufgenommene Energie in Form von Wärmestrahlung im Infrarotbereich wieder ab.

Handelt es sich um weit entfernte Galaxien, verschiebt sich das Spektrum zu längeren Wellenlängen und landet damit im Submillimeterbereich. Diese Rotverschiebung ist Folge eines Doppler-Effekts, der dadurch zu Stande kommt, dass die Galaxien wegen der Expansion des Weltalls von der Erde wegdriften. Da-


T.J. PEARSON, CALIFORNIA INSTITUTE OFTECHNOLOGY


P. SCHILKE, MPI FÜR RADIOASTRONOMIE, BONN

Auf der 5000 Meter hohen wüstenartigen Chajnantor-Ebene in den chilenischen Anden (links) hat das neu errichtete Submillimeter-Teleskop Apex (oben) exzellente Sicht ins All.

bei »fliehen« sie umso schneller, je weiter weg sie sind. Aus der Rotverschiebung der Strahlung aus einer Galaxie kann man daher auf deren Entfernung schließen. Damit kennt man zugleich ihr Alter: Es ergibt sich aus der Zeit, die das Licht für den Weg zur Erde braucht.

Die Mehrheit der bislang gefundenen Submillimeterquellen liegt bei einer Rotverschiebung zwischen zwei und vier. Wenn es sich dabei wirklich um Starburst-Regionen handelt, hat sich ein großer Teil der Sterne etwa 4 Milliarden Jahre nach dem Urknall gebildet, und die Sternbildungsrate liegt in diesen jungen Galaxien bei tausend Sonnenmassen pro Jahr. Das ist etwa zehnmal so viel wie in den hellsten nahe gelegenen Starburst-Galaxien. Optische Messungen für sich allein genommen ergäben nur ein Fünftel dieses Wertes.

Eindeutige Schlüsse werden sich allerdings erst ziehen lassen, wenn eine größere Anzahl von Submillimeterquellen untersucht werden kann. Daran hapert es bisher, denn insbesondere am Südhimmel sind noch nicht viele derartige Objekte entdeckt worden. Eine wesentliche Aufgabe von Apex wird es daher sein, die vom warmen Staub emittierte kontinuierliche Submillimeterstrahlung großflächig zu erfassen. Um dieser Pfadfinderfunktion gerecht zu werden, verfügt es über ein Bolometer namens »Laboca« (für *large bolometer camera*, im Spanischen bedeutet das Wort aber zugleich »der Mund«) als Detektor.

Fühler für Strahlungswärme

Solche Geräte sind auch in der Infrarot-Astronomie üblich und weisen elektromagnetische Strahlung mit Hilfe so genannter Thermistoren nach. Das sind im wesentlichen Thermometer, die sich durch die einfallende Strahlung geringfügig erwärmen. Damit Bolometer den winzigen Temperaturanstieg überhaupt messen können, müssen sie auf extrem tiefe Temperaturen (etwa 200 Millikelvin) gekühlt werden.

Laboca besteht aus 295 Thermistoren, die jeweils Strahlung von einer anderen Stelle am Himmel registrieren. Die Kamera bildet auf diese Weise eine viel größere Himmelsregion ab als ein einzelner Empfänger: Sie erstellt von einer Fläche mit etwa dem halben Vollmonddurchmesser gewissermaßen ein Foto mit 295 Pixeln.

Bevor die ankommende Strahlung auf die Thermistoren trifft, wird ein schmales Spektralband herausgefiltert – unter anderem, um störendes Rauschen zu unterdrücken, das sonst die schwachen astronomischen Signale überdecken würde. Für Laboca wurde ein Wellenlängenbereich bei 870 Mikrometern ausgewählt, da die Atmosphäre in diesem »Fenster« besonders durchlässig ist. Diese Wellenlänge entspricht einer Frequenz von 345 Gigahertz; die Bandbreite des Filters wie auch des atmosphärischen Fensters beträgt etwa 50 Gigahertz.

Ein einzelnes Bolometer liefert keine Informationen über die spektrale Energieverteilung der gemessenen Submillimeterstrahlung. Deshalb wird bei Apex neben Laboca noch ein weiteres Bolometer-Array mit 37 Elementen zum Einsatz kommen, das auf Wellenlängen von 350 Mikrometern anspricht. Dadurch erhalten die Astronomen einen zusätzlichen Messpunkt und können grobe Rückschlüsse auf den spektralen Charakter der vom warmem Staub emittierten Strahlung ziehen, aus dem sich beispielsweise dessen Temperatur ableiten lässt.

Um auch einzelne Spektrallinien beobachten zu können, verfügt Apex zusätzlich über so genannte Heterodyn-Empfänger. Deren Kernstück ist ein nichtlineares Element, in dem das hochfrequente Himmelssignal mit Strahlung einer ähnlichen Frequenz überlagert wird. Das resultierende Differenzsignal ist niederfrequent – es liegt bei einigen Gigahertz – und kann deshalb elektronisch verstärkt und analysiert werden.

Mit Heterodyn-Empfängern lassen sich Spektrallinien innerhalb eines schmalen Frequenzbands mit einer Genauigkeit von 0,5 bis 2 Gigahertz bestimmen. Apex wird über mehrere solcher Detektoren für Frequenzen zwischen 200 Gigahertz (etwa 1 Millimeter) und 1 Terahertz (etwa 350 Mikrometer) verfügen. Da zu einer bestimmten Zeit jeweils nur ein Instrument messen kann, wollen die Astronomen im Idealfall per Knopfdruck zwischen den diversen Bolometern und elektronischen Empfängern hin und her schalten können.

Die Linienspektren der Atome, Moleküle und Ionen in den interstellaren Wolken ermitteln zu können ist für die Astronomen sehr wichtig. Denn dadurch erfahren sie Genaueres über die physikalischen und chemischen Prozesse in den sternbildenden Regionen. Nach dem Urknall bildete sich aus den umherschwirrenden Elementarteilchen zunächst nur atomarer Wasserstoff; später kamen kleine Mengen an Helium, Lithium und Beryllium hinzu. Alle schwereren Elemente müssen bei Kernfusionsprozessen in Sternen ausgebrütet worden sein. Durch die Identifikation der Elemente in Galaxien mit hohen Rotverschiebungen kann man daher feststellen, wann sich die ersten Sterne bildeten, während der Nachweis bestimmter Moleküle anzeigt, in welchem Entwicklungsstadium sich eine Galaxie befindet. ▷

▷ Massereiche Sterne, von denen es in den frühen Epochen des Universums sehr viel mehr als heute gab, haben enormen Einfluss auf ihre nächste Umgebung. Sie geben in ihrer kurzen Lebenszeit extrem viel Energie ab – in Form von elektromagnetischer Strahlung und heftigen Winden, die sich mit Überschallgeschwindigkeit bewegen. Diese Strahlung heizt den Staub auf, ionisiert Atome und Moleküle und/oder versetzt sie in höhere Energieniveaus.

Die angeregten Zustände sehr vieler Moleküle – darunter Kohlenmonoxid, Ammoniak und Methylalkohol – liegen in jenem Energiebereich, welcher der Submillimeterstrahlung entspricht. Von besonderem Interesse sind dabei die Spektren der Moleküle auf der Oberfläche von Sternen, deren Fusionsofen gerade erst gezündet hat. Ihre chemische Zusammensetzung stellt keine Momentaufnahme dar, sondern spiegelt die Entwicklungsgeschichte des Sterns wieder.

Die von den starken Winden ausgelösten Turbulenzen in den Molekülwolken führen dazu, dass die Spektrallinien für den irdischen Beobachter – wiederum wegen des Doppler-Effekts – verschoben sind. Ihre Bestimmung gibt folglich nicht nur Auskunft über die Chemie der Molekülwolken, sondern auch über deren Dynamik, inklusive Dichte und Temperatur. Die Molekülspektren offenbaren zugleich, ob eine solche Wolke lediglich eine vorübergehende Dichteschwankung ist oder ob sie sich zusammenzieht und in einen so genannten Protostern übergeht.

Als solchen Sternvorläufer bezeichnet man eine kompakte Molekülwolke, die zwar schon unter ihrem eigenen Gewicht kollabiert ist, in der aber noch keine Kernfusionen stattfinden. Protosterne haben eine Temperatur von etwa dreißig bis fünfzig Kelvin und sind daher nicht im nahen und mittleren Infrarotbereich nachzuweisen. Mit Hilfe der Submillimeterastronomie kann man sie dagegen bis in einer Entfernung von wenigen hundert Lichtjahren im Detail untersuchen. Das Hauptinteresse gilt dabei der Entstehung massereicher Sterne, über die es derzeit unterschiedliche, sich zum Teil widersprechende Theorien gibt. Ein Schwerpunkt von Apex wird es sein, Regionen zu finden, in denen sich massereiche Sterne bilden, und aufzuklären, welche physikalischen und chemischen Prozesse dort ablaufen.

Startschuss für die Datennahme

Auch den Kosmologen wird Apex neue Erkenntnisse bringen. Das Weltall ist von einer sehr gleichmäßigen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung erfüllt, die sich gleichsam als Nachglühen des Urknalls interpretieren lässt. Wenn diese Strahlung einen Galaxienhaufen durchquert, wird sie an dem mehrere Millionen Grad heißen Plasma in seinem Inneren gestreut, was ihr Spektrum geringfügig verzerrt. Dieser »Sunjajew-Seldowitsch-Effekt« verspricht interessante Aufschlüsse über die großräumige Struktur des Universums. Er müsste zu beobachten sein, wenn man die Radiosignale von Galaxienhaufen aufzeichnet und mit den entsprechenden Röntgendaten vergleicht. Deshalb soll Apex außer den beiden schon erwähnten Bolometern ein weiteres Array aus 295 Thermistoren erhalten, das für Wellenlängen von zwei Millimetern empfindlich ist.

Mittlerweile ist das Teleskop in der Chajnantor-Hochebene vollständig aufgebaut. Im November wurde die Reflektoroberfläche durch Justierung der Paneele genau eingestellt. Demnächst wird der Testbetrieb mit einem einfachen Bolometer beginnen. Das Laboca-Array dürfte im Sommer installiert werden. Nach einer mehrmonatigen Testphase fällt dann im Herbst der Startschuss für die eigentliche Datennahme. In einem Beobachtungszeitraum von rund sechs Jahren wollen die Astronomen eine Karte der Submillimeterquellen in der südlichen Hemisphäre anfertigen. Danach wird zu entscheiden sein, ob Apex im Alma-Interferometer aufgeht, oder ob es mit seinen einzigartigen Bolometer-Arrays so wertvolle Informationen liefert, dass es für eigene wissenschaftliche Untersuchungen erhalten bleibt.

Olivia Meyer ist promovierte Physikerin und freie Wissenschaftsjournalistin in Ratingen.

MESSTECHNIK

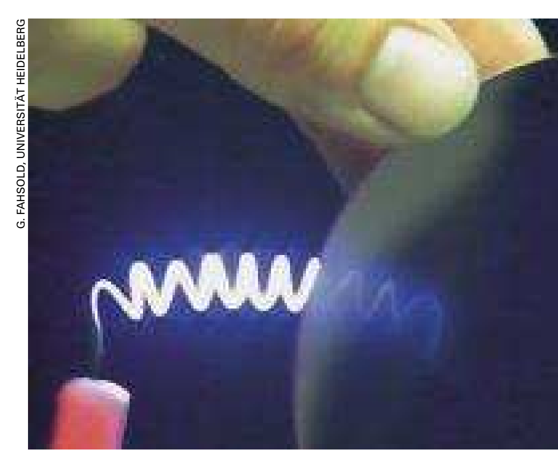
Tanz der Elektronen

Mit Infrarotlicht lässt sich der elektrische Widerstand extrem dünner Metallschichten kontaktfrei messen – zur Freude der Chiphersteller.

Von Gerhard Fahsold und Annemarie Pucci

Mag auch Silizium der Stoff sein, aus dem Transistoren bestehen – erst feinste Leitungen aus Aluminium oder Kupfer machen daraus einen elektronischen Schaltkreis. Ihr elektrischer Widerstand bestimmt den Energieverbrauch und somit die beim Betrieb erzeugte Wärme. Sie abzuführen wird immer problematischer – eine Folge der zunehmenden Miniaturisierung der elektronischen Komponenten, verbunden mit dem Trend zum mehrschichtigen Schaltungsaufbau. Entsprechend steigen die Anforderungen an die elektrische Leitfähigkeit der metallischen Bahnen.

Diese hängt von der Anzahl freier Elektronen im Kristallgitter und von deren freier Weglänge ab, also der mittleren Distanz, die sie zwischen zwei Stößen mit Gitteratomen zurücklegen. Bei Zimmertemperatur beträgt diese Länge typischerweise wenige zehn Nanometer. Erreichen nun die für die Mikroelektronik benötigten Strukturen diese Dimension, schränken ihre Grenzflächen die Beweg-



G. FAHSOLD, UNIVERSITÄT HEIDELBERG

▲ Das Chipmaterial Silizium wirft sichtbares Licht wie ein Spiegel zurück, weshalb es für das menschliche Auge metallisch glänzend erscheint. Doch für die Infrarotstrahlung, die ein glühender Draht aussendet, ist der Halbleiter-Wafer durchlässig.

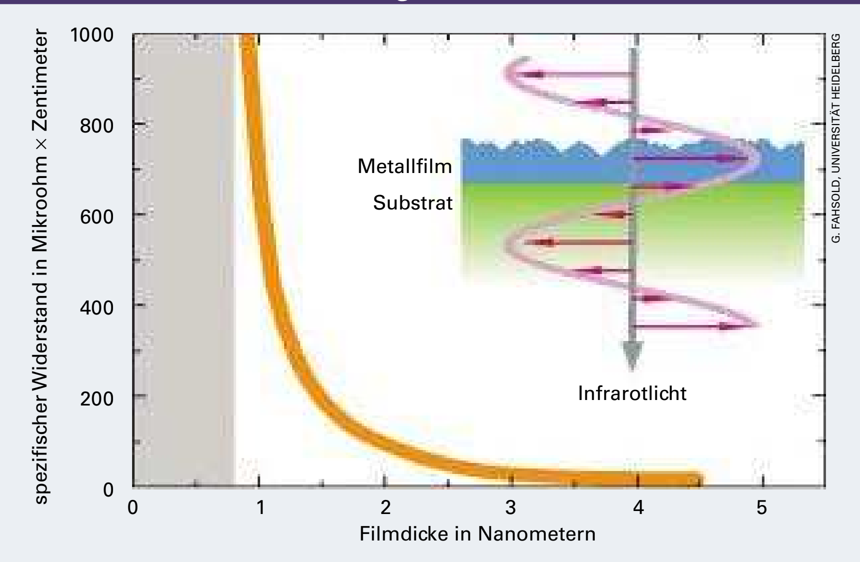
lichkeit der Elektronen zusätzlich ein: Der spezifische Widerstand steigt an.

Die genauen Verhältnisse zu kennen ist für die optimale Auslegung eines Chips also sehr wichtig. Um die Leitfähigkeit ultradünner Filme oder Nanodrähte zu ermitteln, verwendet man im Allgemeinen eine so genannte Vierpunktmessung: Über zwei Kontakte wird ein Strom durch die Probe geführt, an zwei weiteren die abfallende Spannung gemessen. Nach dem Ohm'schen Gesetz ergibt sich der gewünschte Kennwert.

Die erforderlichen Zuleitungen sind aber ein Problem. Sie werden entweder mit großem Aufwand lithografisch hergestellt oder aber als mikroskopisch feine Messspitzen an die Probe herangeführt. Letzteres birgt nicht nur wegen der mechanischen Belastung Gefahren, auch eine Verunreinigung durch das Kontaktmaterial ist möglich. Zudem kann der Wärmefluss über die Zuleitungen und die Streuung der Ladungsträger an den Kontaktflächen die Messung verfälschen.

Um den Widerstand metallischer Schichten während der Herstellung einer Schaltung in der Fabrik, also während der Abscheidung von Metalldampf auf dem Silizium, zu bestimmen, wären diese Verfahren sogar völlig ungeeignet. Die erforderlichen Leitungen würden regelrechte Schatten werfen und die automatisch ablaufenden Prozesse stören.

Widerstandsmessung mit Licht



In einem dünnen Metallfilm auf dem Halbleiter oder Isolator erzeugt das elektrische Feld des Infrarotlichts elektrische Ströme und wird dadurch teilweise absorbiert. Aus der Infrarotdurchlässigkeit können Fachleute daher den spezifischen Widerstand des Films ermitteln. Dieser wächst auf Grund von Streueffekten und wegen der unregelmäßigen Form der Filme mit abnehmender Dicke stark an.

Schwingen im Lasertakt

Kürzlich konnten wir nun in Experimenten zeigen, dass es mittels Infrarotspektroskopie gelingt, den Widerstand eines ultradünnen Metallfilms auch berührungsfrei – also ohne jegliche Kontaktierung – zu messen. Strahlt man Infrarotlicht senkrecht hindurch, regt sein elektrisches Feld die freien Metallelektronen zu Schwingungen an, sodass in dem Film ein Wechselstrom fließt. Sofern sich das Feld langsam genug ändert, folgt ihm dieser Strom weit gehend synchron. Wie in einem typischen Metallwiderstand wird Ohm'sche Wärme erzeugt, die sich aus Gründen der Energieerhaltung als Absorption von Infrarotlicht bemerkbar macht. Das Ausmaß, in dem der Metallfilm das hindurchtretende Licht abschwächt, gibt also Auskunft über seine Leitfähigkeit.

Diese Messung ist nicht nur kontaktfrei, sondern lässt sich auch bei verschiedenen Lichtfrequenzen durchführen. Das bringt einen weiteren wesentlichen Vorteil gegenüber der Vierpunktmethode. Je höher die Frequenz, desto stärker hinken die induzierten Ströme auf Grund der trägen Masse der Elektronen dem antreibenden Feld hinterher. Es wird dann immer weniger Wärme erzeugt und damit auch weniger Licht absorbiert. Fährt der Prüfer also ein Frequenzspektrum durch, kann er aus dem Verlauf der Absorption zwei grundlegende Parameter des Ladungstransports ablesen: die Anzahl der Ladungsträger pro Volumeneinheit und ihre Streurate.

Diese beiden Kenngrößen, von denen die Leitfähigkeit abhängt, lassen sich per Infrarotspektroskopie somit separat analysieren. Auf diese Weise gelingt es, die Auswirkungen der äußeren Form eines Films und seiner inneren Grenzflächen (Korngrenzen) getrennt zu erfassen; zudem kann man quantenphysikalische Effekte von solchen klassischer Streuprozesse unterscheiden.

Wird zum Beispiel während der Abscheidung eines Metalls auf einen Halbleiter oder Isolator die Infrarottransmission des entstehenden dünnen Films gemessen, ergibt sich ein viel größerer Wert für den spezifischen Widerstand, als er für das entsprechende Metall in Tabellenbüchern steht. Gründe dafür sind verschiedenartige Störungen des Schichtaufbaus, die aus dem Herstellungsprozess resultieren. So deutet der spektrale Verlauf der Infrarotabsorption eines Kupferfilms, der auf Silizium abgeschieden wurde, darauf hin, dass der Film aus vielen einzelnen Kristallen (»Körnern«) besteht, an deren Grenzen unerwünschte Streuprozesse ablaufen. Eine andere Störung findet sich bei Eisenfilmen auf Magnesiumoxid: Hier enthüllt die Spektroskopie, dass die Filme ungleichmäßig wachsen und dadurch eine unregelmäßige äußere Form annehmen.

Besonders kritisch ist es, wenn einzelne Bereiche beim Wachstum so dünn bleiben, dass die Ladungsträger keine durchgehenden Strompfade mehr finden. Im erwähnten Beispiel der Eisenfilme liegt dieser so genannte Perkolationsübergang bei einer besonders geringen Dicke von nur etwa 0,8 Nanometern – was fünf Atomlagen entspricht. Aus den Infrarotspektren kann der Fachmann ablesen, wann diese Schwelle bei der Filmherstellung durchschritten wird. Das berührungsfreie Messverfahren eignet sich somit auch ideal, um den Fortgang der Metallabscheidung direkt zu verfolgen. Damit bietet es zugleich die Chance, die Prozessparameter schon während der Versuchsläufe zu optimieren.

Gerhard Fahsold und **Annemarie Pucci** leiten die Arbeitsgruppe Oberflächenphysik und Infrarotspektroskopie am Physik-Institut der Universität Heidelberg. ▷

▷ GEHIRNFORSCHUNG

Früh übt sich das Sprachgenie

Schon kurze, gelegentliche Märchenstunden in einer Fremdsprache genügen, damit Kinder im ersten Lebensjahr ein Ohr für die andersartigen Laute entwickeln. Allerdings muss die Märchenfee schon persönlich auftreten.

Von Pia Prasch

Wer hat sich nicht schon einmal über Chinesen amüsiert, weil sie das »r« wie ein »l« aussprechen. Derlei Ungeschicklichkeit beruht aber nur vordergründig auf mangelndem Artikulationsvermögen; letztlich wurzelt sie in einer verengten Wahrnehmung. In einer frühen, empfänglichen Phase kann jedes Kind noch sämtliche Laute aller Sprachen der Welt auseinander halten. Doch mit zunehmender Gewöhnung an den Klang der Muttersprache – zwischen dem sechsten und zwölften Lebensmonat – schwindet diese Fähigkeit. Vokale oder Konsonanten, die dem Kind bis dahin nicht zu Ohren gekommen sind, kann es dann schlichtweg nicht mehr richtig erkennen; sein Gehirn interpretiert sie in einer Art akustischen Täuschung als ähnlich klingende Laute, die ihm vertraut sind. So hören Chinesen das in ihrer Sprache nicht vorkommende »r« als »l« – oder wir Deutsche das englische »th« als »s«. Wenn jemand aber einen Laut falsch wahrnimmt, kann er ihn auch nicht richtig aussprechen.

Kinder, die mehrsprachig aufwachsen, sind da im Vorteil: Sie bewahren sich ein größeres Differenzierungsvermögen in der Lautwahrnehmung. Aber wie häufig muss eine zweite Sprache in der empfänglichen Phase gehört werden, damit ein Kind sich ihre Charakteristika einprägt? Das hat Patricia Kuhl von der Universität von Washington in Seattle mit ihren Kollegen nun untersucht *(Proceedings of the National Academy of Sciences, Bd. 100, S. 9096)*.

▼ **Kindgerecht erzählt die Chinesin Huei-Mei Liu neun Monate alten amerikanischen Säuglingen Geschichten in Mandarin.**



P. KUHL, UNIVERSITY OF WASHINGTON, SEATTLE

Dazu konfrontierten die Forscher 16 neun Monate alte, einsprachig aufwachsende amerikanische Kinder mit der chinesischen Umgangssprache Mandarin. Über vier Wochen lasen ihnen zwei Muttersprachler in zwölf Sitzungen für jeweils 25 Minuten chinesische Texte vor und präsentierten ihnen Spielzeug. Im Anschluss wurde überprüft, ob die Kinder in der Lage waren, verschiedene Laute der fernöstlichen Sprache auseinander zu halten.

Unmündige Fremdsprachenschüler

Da die neun Monate alten Probanden noch nicht direkt befragt werden konnten, nutzten die Forscher eine andere Möglichkeit der Kommunikation: Die Kinder waren in Vorversuchen daran gewöhnt worden, dass auf ein Paar unterschiedlicher Laute ein trommelndes Spielzeugäffchen an ihrer Seite erschien. Sobald sie zwei verschiedene Laute vernahmen, drehten sie deshalb in freudiger Erwartung den Kopf. In der Studie diente diese Reaktion als Beweis dafür, dass sie die beiden Laute unterscheiden konnten.

In der Kontrollgruppe befanden sich ebenfalls 16 amerikanische Kleinkinder aus rein englischsprachigen Haushalten. Ihnen wurde lediglich in ihrer Muttersprache vorgelesen und das Spielzeug jeweils auf Englisch präsentiert.

Wie sich zeigte, reichten die relativ kurzen und seltenen Hörerlebnisse aus, um zu verhindern, dass sich das Gehirn der neun Monate alten Kleinkinder völlig auf ihre Muttersprache spezialisierte. Auch zwölf Tage nach der letzten Sitzung konnten die unmündigen Fremdsprachenschüler die im Englischen nicht existierenden chinesischen Laute immer noch auseinander halten. Den Probanden der Vergleichsgruppe gelang das zu keiner Zeit.



P. KUHL, UNIVERSITY OF WASHINGTON, SEATTLE

▲ **Die Lernkontrolle: Sobald die Kleinen unterschiedliche Laute hören, wissen sie, dass links von ihnen ein trommelschlagendes Äffchen auftauchen wird. In freudiger Erwartung drehen sie deshalb schon vorab den Kopf.**

»Prima«, mögen wohlmeinende Eltern nun sagen, »dann kaufen wir doch einfach eine fremdsprachige Kassette und spielen sie dem Kind dreimal in der Woche vor.« Doch ein schlichtes Tonband kann den Sprachlehrer aus Fleisch und Blut leider nicht ersetzen. Das brachte eine zweite Studie ans Licht, in der Patricia Kuhl und ihre Mitarbeiter die Rolle der sozialen Interaktion beim Spracherwerb untersuchten. Diesmal waren es virtuelle Lehrer, welche den Kleinen englische oder chinesische Märchen vorlasen und ihnen Spielzeug präsentierten. Doch die Kinder nahmen Sprache, die aus dem Fernseher kam oder vom Band abgespielt wurde, kaum zur Kenntnis. Und im anschließenden Test konnten die Chinesisch-Schüler einzelne Laute auf Mandarin ebenso wenig unterscheiden wie ihre nur mit Englisch konfrontierten Altersgenossen.

Ähnliches ist auch von einigen Singvogelarten bekannt. So lernen Sperlinge den Gesang fremder Vogelarten nicht vom Band. Sind jedoch lebende Vögel die Tutoren, zwitschern die Spatzen die Me-

lodien nach. Zebrafinken können ihren artspezifischen Gesang zwar mit verbundenen Augen erlernen – aber nur, wenn sie Körperkontakt zum Vorsänger haben.

Analog zu den Vögeln scheint auch beim Menschen persönliche Zuwendung und Motivation der Schlüssel zum Spracherwerb zu sein. Die direkte Ansprache des Kindes, überdeutliche Betonung und wechselnde Lehrer fördern nach den Erkenntnissen der Forscher den Lernerfolg. Die akustische Variation durch unterschiedliche Sprecher erleichtert auch Erwachsenen das Erlernen einer Fremdsprache.

Im Experiment folgten die Kinder den Blicken ihrer realen Sprachlehrer, wenn diese ein Bild oder Spielzeug anschauten. Dies ist ein normales Verhalten bei neun Monate alten Säuglingen, welches das natürliche Lernen unterstützt. Kann ein Kind den Namen eines Gegenstandes mit einem visuellen Eindruck verknüpfen, fällt es ihm leichter, das entsprechende Wort aus dem Zusammenhang herauszuhören und in seine Einzellaute zu zerlegen. Die virtuellen Lehrer weckten keine solche Aufmerksamkeit bei den kleinen Versuchspersonen.

Damit ein Kind fremdsprachige Wörter im späteren Leben mühelos akzentfrei aussprechen kann, sollte es also im ersten Lebensjahr bereits Kontakt mit Muttersprachlern haben. Der frühe Beginn des Unterrichts hat aber noch einen weiteren großen Vorteil: Wie Forscher um Karl H. S. Kim von der Cornell-Universität in Ithaca (US-Bundesstaat New York) schon 1997 nachweisen konnten, verarbeiten Menschen eine zusätzliche Sprache, die sie bis zum dritten Lebensjahr erworben haben, im selben Gehirnareal wie ihre Muttersprache. Beginnt der Unterricht erst später, muss für die neu hinzukommende Sprache mit viel Anstrengung ein eigenes neuronales Netz im Cortex angelegt werden. ▷

Pia Prasch ist Diplombiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

GLOSSE

Das Mysterium der Handtasche

Moderne Technik bringt Licht ins Dunkel des unverzichtbaren weiblichen Accessoires.

In den wirklich wichtigen Dingen des Lebens sind wir Männer den Frauen klar überlegen, das ist nicht nur eine unbestreitbare Alltagserfahrung, sondern auch wissenschaftlich erwiesen. Wann immer uns der Kampf ums Dasein beispielsweise einen Stadtplan oder einen Dartpfeil in die Hand drückt, zeigt sich der evolutionär bedingte Vorsprung des Maskulinen. Dass die holde Weiblichkeit im Verbalen und beim Einfädeln von Zwirn Punkte macht, beeindruckt uns wenig. Schließlich haben wir auch bei vielschichtigeren Alltagsproblemen wie dem viel beschworenen Einparken die Nase vorn. Allerdings ist die wissenschaftliche Untermauerung hier noch dürftig: Aufgaben, die eine Kombination verschiedener Grundfertigkeiten erfordern, werden bei herkömmlichen Kognitionstests nicht erfasst.

Deshalb ist es zu begrüßen, dass die Industrie der Wissenschaft nun ein typisch weibliches Accessoire erschließt, dessen Handhabung an Komplexität kaum zu überbieten ist: die Handtasche. Vom Schlüsselbund über Lippenstift und Ersatzstrumpfhose bis hin zum Handy nimmt sie alles auf, was frau so braucht. Ganz im Gegensatz zur maskulinen Aktentasche entbehrt dieses Behältnis aber so gut wie aller funktionalen Gliederungselemente – ein chaotisches Schwarzes Loch, dessen Nutzung rationaler Analyse nicht zugänglich ist.

Das soll sich nun ändern. Ein bekannter Kunststoffhersteller aus Leverkusen hat gemeinsam mit einem Schweizer Spezialisten für Elektrolumineszenz eine Folie entwickelt, die unter elektrischer Spannung erstrahlt und zudem in jede Form zu bringen ist. Leuchtelemente daraus sollen künftig das Innere von Handtaschen sanft erhellen. Der deutsche Lederspezialist Bree hat bereits einen Prototyp gefertigt.

Vorbei also die Zeit des blinden Wühlens. Ein Knopfdruck genügt und der Lippenstift lässt sich visuell orten. Der Kognitionsforschung eröffnen sich damit ungeahnte Perspektiven. Plötzlich sind neue Testdesigns denkbar, die klären, welche Fertigkeiten frau bei der Interaktion mit ihrer Handtasche nutzt. Setzt sie vor allem auf den Tastsinn, was gut zu der nachgewiesenen Überlegenheit im Feinmotorischen passen würde? Oder ist es die Fähigkeit, sich Orte von Objekten zu merken, die bei der Navigation in den bislang dunklen Abgründen zum Tragen kommt? Angesichts der unstrukturierten Umgebung des biegeschlaffen Behälters wäre Letzteres eine enorme Leistung. Das müsste uns Männern zu denken geben.

Doch in Wahrheit ist das Phänomen Handtasche vermutlich vor allem tiefenpsychologisch begründet, beinhaltet das rituelle Durchwühlen des gesamten Inhalts doch in erster Linie eine Selbstvergewisserung: Dies ist mein Lippenstift, dies ist mein Handy, ... (Pendant in der Männerwelt: das gebetsmühlenartige Aufheulenlassen des Acht-Zylinders an der roten Ampel). In diesem Fall dürfte der Handtasche mit Innenraumbeleuchtung zwar kein sonderlicher Markterfolg beschieden sein, aber wir Männer bräuchten uns jedenfalls keine Gedanken über eine Gefährdung unseres kognitiven Primats zu machen – und könnten auch in Zukunft stolz mit Pfeilen auf Straßenkarten werfen.

Klaus-Dieter Linsmeier

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



AM RANDE

Unerwartetes Versuchsergebnis? Error!

Gehört der Wissenschaftler aus Fleisch und Blut zu einer aussterbenden Spezies?

Ein Gespenst geht um in der Wissenschaft – das Gespenst des Roboforschers. Kürzlich stellten britische Computerspezialisten im Fachblatt »Nature« *(Bd. 427, S. 181)* den vollautomatischen Wissenschaftler vor. Er besteht aus einem Roboter, der Flüssigkeiten portioniert und in Reaktionsgefäße abfüllt, einem Lesegerät, das auswertet, was in den zusammengeschütteten Lösungen passiert, und drei Computern. Der erste steuert den Roboter, der zweite das Lesegerät und der dritte trägt die Verantwortung – als großer Chef sozusagen, der alles überwacht und Roboter sowie Lesegerät mitteilt, was sie tun sollen.

Nur die Spielerei eines Hobbybastlers? Mitnichten. Dr. Robot bearbeitet Forschungsaufgaben (fast) so wie ein Wissenschaftler aus Fleisch und Blut: Er stellt eine Hypothese auf, überlegt sich, mit welchen Experimenten er sie überprüfen kann, führt die Versuche selbsttätig durch und interpretiert die Ergebnisse. Mit den neuen Einsichten verfeinert er seine Hypothese und so weiter. Nach mehreren Durchläufen hat er die Lösung des Problems gefunden – ganz ohne menschliches Zutun. Überdies kalkuliert er auch gleich noch die Ausgaben und plant die Experimente so kostengünstig wie möglich.

Wer jetzt bezweifelt, dass das funktioniert, dem sei gesagt: Dr. Robot hat in seiner kurzen Karriere bereits selbstständig herausgefunden, welche Gene es Hefezellen ermöglichen, so genannte aromatische Aminosäuren zu produzieren. Die Computerexperten fütterten ihren Siliziumkollegen mit Informationen zum Zellstoffwechsel und stellten ihm Knockout-Hefezellen zur Verfügung, bei denen bestimmte Gene inaktiviert sind. Indem Dr. Robot die Zellen in verschiedene Nährlösungen gab und ihr Wachstum beobachtete, lüftete er den Schleier der verschlungenen Stoffwechselwege – mit minimalen Kosten und höchster Effizienz.

Das Problem war überschaubar – zugegeben – und außerdem schon erforscht. Aber das schmälert Robodocs Leistung nicht: Er sollte ja vorerst nur getestet werden. Überdies ist seine Vorgehensweise durchaus bezeichnend für den Automatismus, der den modernen Laboralltag vieler Forschungsrichtungen prägt: Screening-Versuche, bei denen Hunderte von Mikrotiterplatten mit Tausenden winziger Flüssigkeitsportionen beschickt werden müssen, bis der Daumen vom beharrlichen Pipettieren erlahmt; Experimente, die man zur statistischen Absicherung dutzende Male wiederholt, bis irgendeine Versuchsbedingung geringfügig verändert wird und das Leiden von neuem beginnt.



Viele Doktoranden, die in einem Forschungslabor gearbeitet haben, werden sich an Pipettier-Orgien bis in die Nachtstunden, Berge von verbrauchten Eppendorf-Gefäßen und schwitzige Hände unterm Latexhandschuh erinnern. Der gern verwendete Begriff »Messknecht« ist durchaus treffend.

Doch damit könnte bald Schluss sein. Stets emsig bei der Sache, nie müde, mit ein bisschen Strom zufrieden und keine Gehaltsforderungen stellend, wäre Dr. Robot der perfekte Messknecht der Zukunft. Falls er mal nicht weiter weiß, ginge er niemandem mit lästigen Fragen auf die Nerven, sondern würde mit freundlich blinkender Diode auf ein fehlendes Upgrade hinweisen oder in diskreter Zurückhaltung einen schweren Ausnahmefehler melden, der mit einem Druck auf den Reset-Knopf behoben wäre. Ab und zu eine neue Festplatte oder mehr Arbeitsspeicher, und Robodoc bliebe ein unerschütterlicher Anker emotionsloser Beständigkeit im Chaos des hektischen Laboralltags.

Doch was machen dann die humanoiden Mitarbeiter, die Doktoranden und Postdocs? Sie könnten, wie es in »Nature« heißt, »kreative Gedankensprünge« wagen – nunmehr befreit vom Joch der Routine. Und so ersteht die Vision der Forschung im 21. Jahrhundert: Heere von Robodocs, unablässig Ergebnisse produzierend, und Scharen von Naturforschern, die grübelnd darüber brüten … Doch werden sie auch die Übersicht behalten? Was, wenn Dr. Robot kilometerlange Datenkolonnen ausspuckt und sich das ganze Labor verzweifelt fragt, was er da eigentlich verzapft?

Besorgt erinnern wir uns an »The Hitchhiker's Guide to the Galaxy«. In diesem berühmten Sciencefiction-Roman erbauen Außerirdische einen kolossalen Supercomputer und stellen ihm die Frage nach dem Sinn des Lebens, des Universums und von allem. Nach siebeneinhalb Millionen Jahren Rechenzeit präsentiert das Elektronenhirn die Antwort. Sie lautet: 42.

Frank Schubert

Der Autor ist promovierter Biophysiker und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Zeitdehnung im Test

Wissenschaftler am Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik konnten eine Kernaussage der Speziellen Relativitätstheorie experimentell mit bisher unerreichter Präzision bestätigen: dass Uhren bei Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit immer langsamer ticken.

Von Georg Wolschin

Kleine, aber hartnäckige Diskrepanzen zwischen Messergebnissen und den Vorhersagen existierender Theorien sind oft Ausgangspunkt neuer naturwissenschaftlicher Erkenntnisse. Deshalb muss sich jede noch so etablierte Lehrmeinung immer wieder die Prüfung durch die Realität gefallen lassen.

Das gilt auch für Albert Einsteins Spezielle Relativitätstheorie, die (in ihrem kinematischen Teil) auf bestechend elegante Weise die klassischen Bewegungsgesetze zu sehr hohen Geschwindigkeiten hin erweitert. Sie beruht ausschließlich auf zwei Postulaten: der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und der Unabhängigkeit der physikalischen Gesetze vom Bezugssystem, sofern dieses keiner Beschleunigung unterliegt, also ein so genanntes Inertialsystem ist.

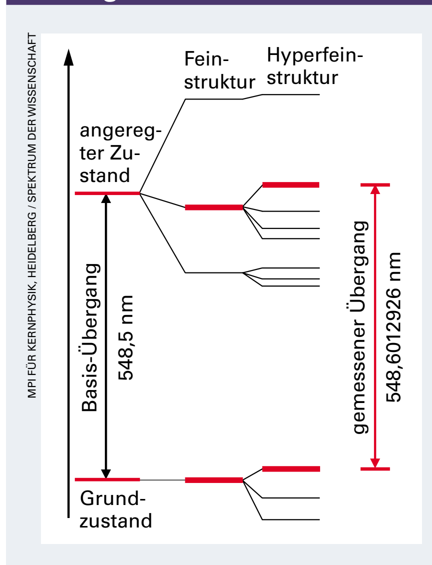
Relativistischer Doppler-Effekt

Einstein gelang es im Jahr 1905, aus diesen Postulaten die so genannte Lorentz-Transformation theoretisch zu begründen, die zuvor schon mehrere Wissenschaftler – darunter Woldemar Voigt (1887), Sir Joseph Larmor (1898) und Hendrik A. Lorentz (1899) – formuliert hatten. Dabei geht es um den Zusammenhang zwischen den Raumzeit-Koordinaten zweier Bezugssysteme, die sich relativ zueinander mit konstanter Geschwindigkeit bewegen.

Aus der Einstein'schen Deutung dieses Zusammenhangs, bei der die Zeit ihren Status als absolute, sich überall gleichartig ändernde Größe verliert, ergeben sich einige merkwürdige Folgerungen. So erscheinen einem Beobachter, an dem eine (erdachte) Rakete fast mit Lichtgeschwindigkeit vorbeirast, alle Objekte darin in Bewegungsrichtung verkürzt und alle Abläufe zeitlupenartig verlangsamt. Physiker sprechen von Längenkontraktion und Zeitdehnung.

Da die Effekte nur bei extrem hoher Geschwindigkeit auftreten, sind sie experimentell schwer exakt zu messen. Einstein selbst hat 1907 einen Vorschlag zur Überprüfung der Zeitdehnung gemacht. Sie beeinflusst nämlich auch die recht genau bestimmbaren Frequenzen von Photonen, die eine bewegte Quelle abstrahlt. Dadurch kommt es zum »relativistischen Doppler-Effekt«. Sein klassisches Gegenstück wird meist mit einem vorbeifahrenden Feuerwehrauto veranschaulicht, dessen Sirenenton zunächst hoch und dann tief klingt. Im relativistischen Fall ist außer der Relativbewegung, die die Blau- oder Rotverschiebung verursacht, auch die Zeitdehnung zu berücksichtigen. ▷

Fliegender Wechsel



Zum genauen Test der Zeitdehnung dienten positiv geladene Lithium-7-Ionen. Sie haben zwei elektronische Zustände mit bekannter Fein- und Hyperfeinstruktur, zwischen denen durch Laserlicht Übergänge ausgelöst werden können. Forscher in Heidelberg maßen an Ionen, die auf 6,4 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt worden waren, die Wellenlänge eines Übergangs zwischen zwei Hyperfeinniveaus, die bei ruhenden Teilchen auf zehn Stellen genau bekannt ist. Die beobachtete relativistische Doppler-Verschiebung gegenüber dem Ruhezustand stimmte exakt mit der Vorhersage der Speziellen Relativitätstheorie überein.

Erste einschlägige Experimente gab es bereits 1938. Als bewegte Quellen dienten dabei Wasserstoffatome, deren Emissionslinien bei Übergängen zwischen angeregten Zuständen mit einem empfindlichen Spektrografen gemessen wurden. Die Spezielle Relativitätstheorie ließ sich so auf vier Prozent genau bestätigen. Mit Lasertechniken an Stelle von konventionellen Spektrometern gelang es später, die Messgenauigkeit um das 10000fache zu steigern.

Jetzt ermöglicht der Einsatz von Speicherringen für geladene Ionen den Vorstoß zu einer neuen Dimension experimenteller Exaktkeit. Eine Vorreiterrolle spielen dabei Wissenschaftler vom Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik in Zusammenarbeit mit Kollegen an der Universität Mainz. Die Gruppe um Dirk Schwalm arbeitet mit einfach positiv geladenen Ionen von Lithium-7, die bei 6,4 Prozent der Lichtgeschwindigkeit (19000 Kilometer pro Sekunde) in einem Ring mit 55,4 Meter Umfang kreisen.

Der Teilchenstrahl wird in einem Tandem-van-de-Graaff-Beschleuniger erzeugt, wo nach einer ersten Beschleunigungsstrecke ein Gas-Stripper von den zunächst negativ geladenen Lithiumatomen im Mittel jeweils zwei Elektronen abstreift. Die so entstandenen $^{7}Li^{+}$-Ionen werden auf einer zweiten Strecke umgekehrter Polarität nochmals beschleunigt und dann in den Speicherring eingespeist. Etwa zehn Prozent von ihnen sind beim Abstreifprozess in einem metastabilen Zustand gelandet, der im Ring eine durchschnittliche Lebensdauer von ungefähr 13 Sekunden hat. Von ihm aus gibt es einen optischen Übergang, bei dem die Elektronen durch Absorption von sichtbarem Licht auf ein höheres Energieniveau angehoben werden.

Dieser Übergang findet in ruhenden Teilchen bei einer Wellenlänge von 548,5 Nanometern statt (Kasten). Verschiedene Effekte bewirken allerdings eine Aufspaltung dieser Absorptionslinie in viele Äste und Zweige. Diese so genannte Fein- und Hyperfeinstruktur ist bei $^{7}Li^{+}$-Ionen gut aufgelöst und präzise bekannt. Schwalm und seine Mitarbeiter maßen bei ihrem Experiment die Frequenz eines Übergangs, deren Wert für ruhende Teilchen 1994 auf zehn Stellen genau bestimmt wurde.

Übergänge in lichtschnellen Ionen

Leider ist die Geschwindigkeit der Ionen im Speicherring längst nicht so einheitlich, wie die Experimentatoren sich das wünschen würden. Sonst ließe sich einfach mit einem durchstimmbaren Laser die Frequenz des optischen Übergangs ermitteln. Tatsächlich sind die Ionen aber nur annähernd gleich schnell, weshalb ihre Absorptionslinie durch den Doppler-Effekt so verbreitert wird, dass der Einfluss der Zeitdehnung nicht mehr erkennbar ist.

Deshalb arbeiteten die Heidelberger Forscher mit zwei Lichtquellen: einem Argonlaser mit einer festen Wellenlänge von 514 Nanometern, den sie von hinten auf die Teilchen richteten, und einem durchstimmbaren Farbstofflaser mit ungefähr 585 Nanometern, der von vorne auf die Ionen zielte. Die beiden Wellenlängen waren so gewählt, dass sie ungefähr der relativistischen Doppler-Verschiebung des Übergangs entsprachen (im ersten Fall nach »Blau« und im zweiten nach »Rot«).

Jeder der beiden Laser markierte im Pulk der unterschiedlich schnellen Ionen diejenige Teilpopulation, deren Geschwindigkeit genau passte, indem er sie mehr oder weniger vollständig in einen kurzlebigen angeregten Zustand hob. Dieser Zustand zerfiel jeweils unter Aussendung von Fluoreszenzlicht, welches die Forscher registrierten – und zwar nicht getrennt, sondern als Summensignal. Das Durchstimmen des zweiten Lasers brachte die beiden angeregten Populationen irgendwann zur Deckung. Da die beiden Laser in diesem Fall dieselben Ionen anregten, während vorher zwei verschiedene Populationen zum Gesamtsignal beigetragen hatten, verlor die Fluoreszenz an Intensität.

Nun folgt aus der Speziellen Relativitätstheorie, dass an dem Punkt, wo die beiden Resonanzen zusammenfallen, das Produkt der zwei unterschiedlichen Laserfrequenzen gleich dem Quadrat der Ruhefrequenz des optischen Übergangs sein muss. Diese einfache Beziehung hängt erstaunlicherweise nicht mehr von der Geschwindigkeit der Ionen ab: Der kombinierte Effekt der nichtrelativistischen Doppler-Verschiebungen wird vom Einfluss der Zeitdehnung gerade kompensiert.

Die geschilderten Messungen ergaben, dass diese Gleichung innerhalb der experimentellen Unsicherheiten in der Tat erfüllt ist. Mithin konnten die Heidelberger Forscher die aus der Theorie berechnete Zeitdehnung auf 0,22 Millionstel genau bestätigen: etwa zehnmal genauer als alle früheren Messungen *(Physical Review Letters, 7.11.2003, Art.-Nr. 190403)*. Falls es gelingt, die Übergangsfrequenz des ruhenden Ions noch präziser zu bestimmen, sind Verbesserungen um eine weitere Größenordnung möglich. Auch wenn heute niemand mehr ernstlich an der Gültigkeit der Speziellen Relativitätstheorie zweifelt, ist es angesichts ihrer fundamentalen Bedeutung gewiss keine vergeudete Liebesmüh, sie anhand möglichst strenger Tests immer strikter zu verifizieren.

Georg Wolschin lehrt an der Universität Heidelberg Physik und ist Wissenschaftsjournalist.

NACHGEHAKT

Bushs Himmelfahrtskommando

Pioniergeist allein reicht für eine bemannte Mission zum Mars nicht aus.

Visionen für die bemannte Raumfahrt zu entwerfen, ist bei US-Präsidenten beliebt. Kennedys Vorgabe, bis Ende der 1960er Jahre einen Amerikaner auf den Mond zu bringen, konnte die Nasa bravurös erfüllen. Nun setzte George W. Bush der US-Raumfahrt ein neues großes Ziel: Rückkehr von Astronauten zum Mond und Weiterflug zum Mars.

Bush schlägt vor, die verbliebenen Raumfähren vor allem dafür zu nutzen, bis 2010 die Internationale Raumstation ISS fertig zu stellen. Deren Besatzung soll hauptsächlich Langzeiteffekte von Raumreisen erforschen. Dann wird der Spaceshuttle durch ein neues Raumschiff ersetzt: das noch zu entwickelnde Crew Exploration Vehicle. 2020 sollen wieder Astronauten auf dem Mond landen und eine permanente Basis aufbauen. Dort, so die Idee, könnte aus den Rohstoffen des Erdtrabanten Treibstoff erzeugt und ein Raumschiff zusammengebaut werden, das die ersten Menschen zum Mars bringt.

Perspektiven für die bemannte Raumfahrt sind dringend nötig. Doch mit bemerkenswerter Nonchalance setzt Bush patriotische Pioniermentalität vor die Wünsche der Wissenschaft – und übersieht, dass es zur Erfüllung eines Traums ganz handfester Fähigkeiten bedarf. Sind diese nicht vorhanden, wird die Vision schnell zur Utopie.

Die Raumfähren der Nasa haben zwar in mehr als hundert Flügen erheblich zum wissenschaftlichen Fortschritt beigetragen, gelten nach zwei Totalverlusten aber als altersschwach und nicht zuverlässig genug. Diese Krise wirkt sich dramatisch auf den weiteren Ausbau und den Betrieb der ISS aus. Das ehrgeizigste und teuerste Projekt der Menschheitsgeschichte umkreist still die Erde – mit zwei Astronauten an Bord, die hauptsächlich Hausmeisterfunktionen erfüllen. Forschung findet unter solchen Bedingungen kaum statt.

Mit seiner Weisung an die Nasa, »alle gegenwärtigen Raumflugaktivitäten und Forschungsprogramme zu überprüfen und sie den von mir skizzierten Zielen anzupassen«, entzieht Bush nun nicht nur der wissenschaftlichen Nutzung der ISS die Grundlage, sondern auch manchen anderen Missionen – beispielsweise dem Hubble-Weltraumteleskop, das ohne den für 2006 vorgesehenen Wartungsflug eines Shuttles vorzeitig ausgemustert werden müsste. Gegen solche Pläne regt sich unter den Wissenschaftlern bereits heftiger Widerstand.

Alle für Bushs Pläne benötigten Komponenten – Crew Exploration Vehicle, Mondbasis und Mars-Raumschiff – müssten völlig neu entwickelt werden. Technisch machbar wäre das wohl; die Konzepte sind in Wernher von Brauns schon vor fünfzig Jahren erschienenem Buch »Das Mars-Projekt« nachzulesen. Finanzierbar wäre das ebenfalls, wenn die USA kurzerhand ihr Haushaltsdefizit verdoppeln oder das Jahresbudget des Pentagons zur Verfügung stellen würden.

Wir Europäer wären gut beraten, derlei Wahnwitz nicht mitzumachen. Die aktuellen Marsmissionen zeigen, wie wertvoll unbemannte Sonden sind. Der Verlust eines Roboters à la Beagle 2 lässt sich leichter verschmerzen als der von Menschen. Denn eines ist klar: Pioniere zahlen für ihren Wagemut oft den höchsten Preis. Die von Bush beschworene Expedition, die vor 200 Jahren den unbekannten Westen der USA erkundete und nach zwei Jahren heil zurückkehrte, überlebte nur deshalb, weil Indianer mit Hunden zum Essen aushalfen. Amerikas Pioniere, die für den Flug zum Mars und zurück ebenso lange bräuchten, können solche Unterstützung nicht erhoffen. Die kleinste Panne würde ausreichen und die Expedition geriete zum sprichwörtlichen Himmelfahrtskommando.

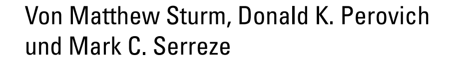
Uwe Reichert

Der Autor ist promovierter Physiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Eisschmelze am Nordpol

Meereis und Gletscher schwinden, Permafrostböden tauen auf, und Sträucher erobern die Tundra: Die globale Erwärmung hinterlässt unübersehbare – und höchst beunruhigende – Spuren in der Arktis.

Der Schwund des Meereises zählt zu den auffälligsten Zeichen des Klimawandels in der Arktis. Die dauerhaft zugefrorene Fläche ist in jedem der letzten drei Jahrzehnte um drei Prozent geschrumpft. Im selben Zeitraum hat die Mächtigkeit der Eisdecke sogar noch stärker abgenommen – teils um vierzig Prozent. Die Aufnahme zeigt den Arktischen Ozean vor der Küste Sibiriens.



Von Matthew Sturm, Donald K. Perovich und Mark C. Serreze

Schneekristalle peitschen mir ins Gesicht, bedecken meinen Bart und den Kragen meines Parkas. Der Wind legt zu, und meine fünf Gefährten sind im Schneetreiben kaum noch zu erkennen. Rund 800 Kilometer unserer insgesamt 1200 Kilometer langen Schneemobil-Fahrt quer durch das arktische Alaska im Spätwinter 2002 liegen bereits hinter uns. Wir sind hergekommen, um die Dicke der Schneedecke zu messen und ihr Isolationsvermögen zu schätzen – ein Faktor, von dem es entscheidend abhängt, ob die Temperatur im Permafrostboden unter dem Gefrierpunkt bleibt. Ich habe einen kurzen Halt veranlasst, um über das weitere Vorgehen zu entscheiden. Der zunehmende Wind bei Temperaturen um –34 Grad Celsius lässt keinen Zweifel daran, dass wir Schutz suchen müssen, und zwar schnell. Ich drücke mein Gesicht gegen die Kapuze meines direkten Nachbarn und rufe: »Sorg dafür, dass alle dicht beieinander bleiben. Wir müssen von diesem exponierten Hang herunter.«

In diesem Moment fehlt mir der Sinn für das Ironische unserer Situation: dass wir erfrieren könnten, während wir auf der Suche nach Beweisen für die globale Erwärmung sind. Doch später, wohlig eingepackt in einem unserer Zelte, beginne ich darüber zu schmunzeln, wie paradox das gewesen wäre. Matthew Sturm

Die Liste ist lang und beeindruckend: die höchsten Lufttemperaturen seit 400 Jahren, eine schrumpfende Meereisdecke und Rekordschmelzraten auf dem Eisschild Grönlands, während sich die Gletscher in Alaska in nie zuvor beobachtetem Tempo zurückziehen. Hinzu kommt, dass die russischen Flüsse immer mehr Wasser führen, die Vegetationsperiode in der Arktis sich jedes Jahrzehnt um einige Tage verlängert und der Dauerfrostboden aufzutauen beginnt. Zusammengenommen künden diese Beobachtungen von einem tief greifenden Wandel in der Arktis. Sein volles Ausmaß ist erst im letzten Jahrzehnt deutlich geworden, als Wissenschaftler aus verschiedenen Disziplinen ihre Erkenntnisse zu vergleichen begannen. Viele von ▷

▷ ihnen arbeiten inzwischen eng zusammen – in dem Versuch, die Bedeutung der Veränderungen zu verstehen und vorherzusehen, was der Nordpolarregion blüht.

Ihre Erkenntnisse werden aber nicht nur regionale, sondern weltweite Bedeutung haben, da die Arktis das irdische Klima insgesamt sehr stark beeinflusst. Ähnlich wie ein Überlauf an einem Stausee den Wasserstand kontrolliert, bestimmen die Polarregionen nämlich die irdische Energiebilanz. Da in den Tropen die Sonneneinstrahlung sehr viel intensiver ist als in den hohen Breiten, transportieren Winde und Meeresströmungen ständig Wärme zu den Polen hin. Solange sich dort eine riesige Schnee- und Eisdecke mit hoher Albedo erstreckt, wird das meiste direkt einfallende Sonnenlicht zurück in den Weltraum reflektiert. Dadurch bleibt die Polarregion kalt und bildet eine gute Senke für die Wärme, die aus niedrigeren Breiten heranströmt. Doch wenn die Eisdecke zu schrumpfen beginnt, strahlt die Arktis weniger Sonnenenergie ins Weltall ab. Dann kann sie auch nicht mehr so viel Wärme aus den Tropen aufnehmen, und der gesamte Planet erwärmt sich.

IN KÜRZE

▶ Anzeichen einer **Erwärmung** finden sich überall in der Arktis. Der dortige **Klimawandel** wirkt sich auf die gesamte Erde aus, da die Polarregionen eine entscheidende Rolle für das Temperaturgleichgewicht des Globus spielen.

▶ Ein kompliziertes Netz von klimatischen **Rückkopplungssystemen** macht es sehr schwierig zu erkennen, ob der **Treibhauseffekt** die Hauptursache für die Erwärmung der Arktis ist.

▶ Die größte **Herausforderung** für die Polarforscher besteht jetzt darin, die weitere Entwicklung zu prognostizieren, damit sich die Menschheit frühzeitig auf **unliebsame Folgen** einstellen kann.

Gewirr von Feedbacks

Die Konsequenzen dieser Entwicklung im Einzelnen vorherzusagen, ist allerdings mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Das liegt vor allem an den verwickelten Rückkopplungen, die das Klima in der Arktis bestimmen. Einige davon sind positiv, verstärken also einen sich anbahnenden Umschwung und verwandeln so einen leichten Stups in einen ordentlichen Stoß. Es gibt aber auch negative Feedbacks, die als Bremse auf das System wirken und jede Veränderung abschwächen.

Die größte Bedeutung für das Klima hat die schon erwähnte Eis-Albedo-Rückkopplung (Kasten auf S. 32): Bei steigenden globalen Temperaturen verkürzen sich die Winter und die Schnee- und Eisdecken schrumpfen, was wiederum die Erwärmung in den mittleren und niedrigen Breiten verstärkt. Ein weiteres Feedback hängt mit den gewaltigen Kohlenstoffmengen zusammen, die in Form von gefrorenem Torf in der Arktis lagern. Wenn dieser Torf im Zuge der globalen Erwärmung auftaut, wird das gebundene Kohlendioxid in die Atmosphäre freigesetzt und sorgt dafür, dass sich nicht nur die Arktis, sondern der gesamte Erdball weiter erwärmt – ein als Treibhauseffekt bezeichnetes Phänomen.

Was die Verhältnisse noch verwickelter gestaltet ist, dass die verschiedenen Rückkopplungsschleifen nicht isoliert operieren, sondern ineinander greifen und sich gegenseitig beeinflussen. Sind schon manche Feedback-Prozesse für sich allein schwer genau zu erfassen, so gilt das umso mehr für die Wechselwirkung zwischen ihnen. Insgesamt bildet die Arktis also ein hochkomplexes System, in dem jede Änderung einer Komponente auf alle anderen durchschlägt – und das oft in einer unüberschaubaren Weise.

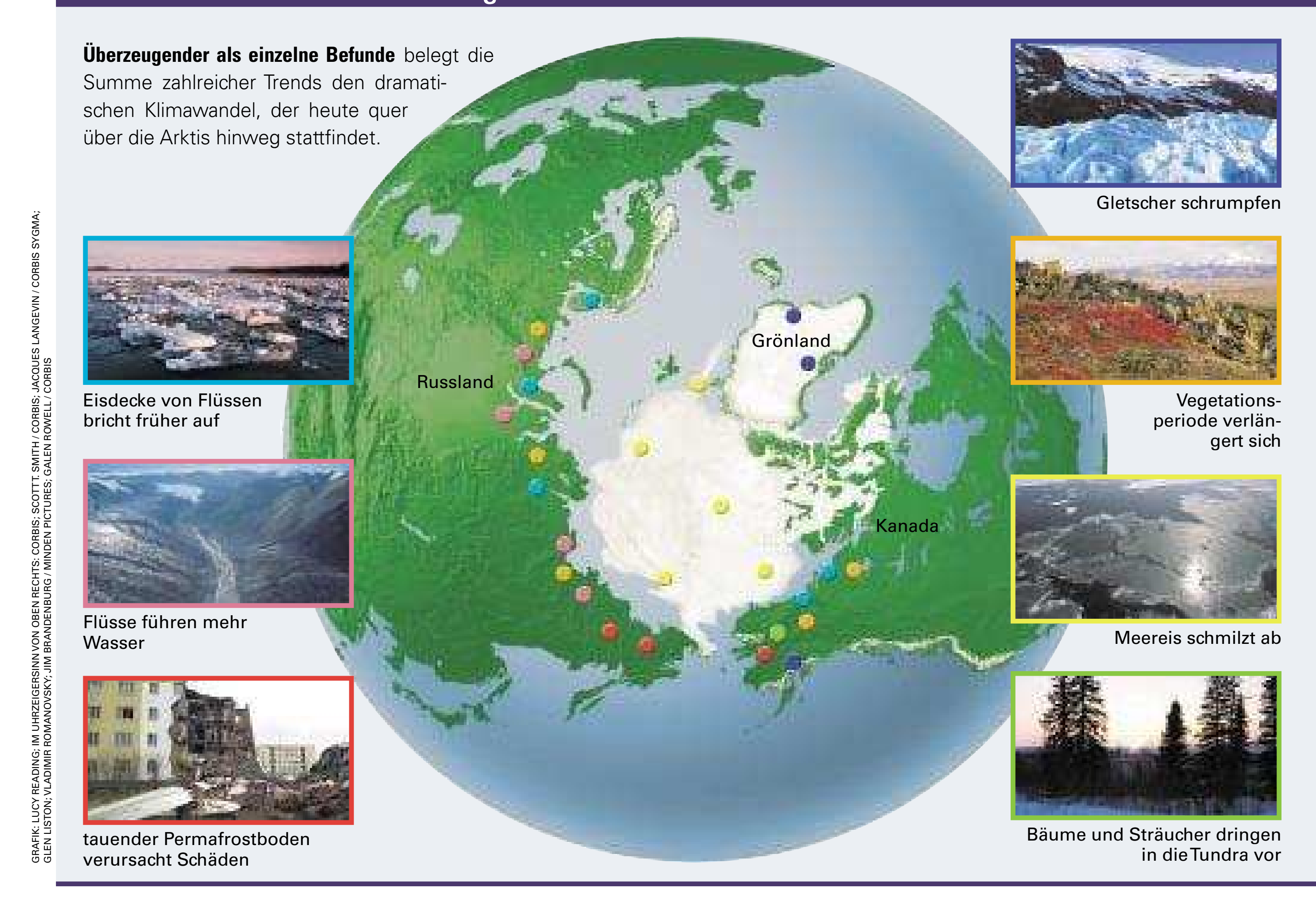


Je genauer die Wissenschaftler hinsehen, umso mehr Veränderungen bemerken sie. So sind die Lufttemperaturen in der Arktis in den vergangenen dreißig Jahren pro Jahrzehnt um 0,5 Grad Celsius gestiegen. Ein Großteil der Erwärmung fand dabei im Winter und Frühjahr statt. Weiter zurückreichende Klimadaten, die von Eis- und Torfkernen sowie von Sedimenten aus Seen stammen und vor allem Auskunft über die Sommertemperaturen geben, stellen die Entwicklung in einen größeren Zusammenhang. Demnach sind die heute gemessenen Temperaturen die höchsten seit vier Jahrhunderten. Sie markieren den vorläufigen Gipfel einer stetigen Erwärmung seit hundert Jahren, als die Arktis aus der Kleinen Eiszeit heraustrat – einer Kälteperiode, die um 1850 endete. Im letzten halben Jahrhundert hat sich der Temperaturanstieg noch einmal dramatisch beschleunigt.

Die jüngste Erwärmung spiegelt sich auch in vielen anderen Zeitreihen wider. So frieren die Flüsse und Seen in der Arktis und auf der gesamten Nordhalbkugel seit der Kleinen Eiszeit immer später im Jahr zu und tauen früher wieder auf. Die Periode der alljährlichen Eisbedeckung ist heute 16 Tage kürzer als um das Jahr 1850. In Alaska wartet jedes Frühjahr ein Jackpot von etwa 300 000 Dollar auf denjenigen, der das Datum errät, an dem die Eisdecke des Tanana River aufbricht. Das Gewinner-Datum hat sich im Durchschnitt um etwa sechs Tage vorverlegt, seit die Wette 1917 ins Leben gerufen wurde. Auch Satellitenbilder zeigen, dass sich die schneefreie Zeit in der

Die Liste der Veränderungen

Überzeugender als einzelne Befunde belegt die Summe zahlreicher Trends den dramatischen Klimawandel, der heute quer über die Arktis hinweg stattfindet.



Eisdecke von Flüssen bricht früher auf

Flüsse führen mehr Wasser

tauender Permafrostboden verursacht Schäden

Gletscher schrumpfen

Vegetationsperiode verlängert sich

Meereis schmilzt ab

Bäume und Sträucher dringen in die Tundra vor

GRAFIK: LUCY READING; IM UHRZEIGERSINN VON OBEN RECHTS: CORBIS; SCOTT T. SMITH / CORBIS; JACQUES LANGEVIN / CORBIS SYGMA; GLEN LISTON; VLADIMIR ROMANOVSKY; JIM BRANDENBURG / MINDEN PICTURES; GALEN ROWELL / CORBIS

Arktis seit Beginn der 1970er Jahre um einige Tage pro Jahrzehnt verlängert und die Vegetationsperiode entsprechend um vier Tage zugenommen hat.

Schrumpfende Gletscher, tauender Permafrostboden

Meine ersten Forschungen über den Klimawandel in der Arktis waren nicht besonders anspruchsvoll: Wandere um einen kleinen Gletscher auf der Insel Ellesmere, bohre Löcher ins Eis, führe lange Metallstangen ein, miss deren Höhe über dem Eis, komme ein Jahr später zurück und schaue nach, ob inzwischen mehr von der Stange zu sehen ist. Wir installierten einen Großteil des Stangennetzes im warmen Sommer 1982 und kehrten 1983 in eine ganz andere Welt zurück – wochenlang Kälte, Schnee und Nebel. Es sah aus wie der Beginn einer neuen Eiszeit. Unser Plan war gewesen, jedes Jahr zurückzukommen; doch wie es so oft passiert, hörten die Geldmittel auf zu fließen, und meine Arktis-Erfahrungen wurden zu nostalgischen Erinnerungen.

Doch manchmal holt uns die Vergangenheit ein. 2002 erhielt ich einen Anruf von einem aufgeregten Doktoranden. Er hatte den Gletscher wieder besucht und ihn stark abgemagert vorgefunden. Meine Stangen waren noch da, aber sie lagen alle auf der Oberfläche des Eises. Wie tief hatte ich sie hineingebohrt? Hatte ich noch meine Feldaufzeichnungen? Er hätte sich nicht zu sorgen brauchen. Mein Geländebuch war noch da. Es stand staubig, aber sicher in meinem Bücherschrank. Jetzt gehe ich zurück zur Insel Ellesmere, um nachzusehen, was von dem Gletscher übrig ist, der 1983 ein fester Bestandteil der Landschaft zu sein schien, der aber, wie ich heute weiß, durchaus noch vor mir vom Erdboden verschwinden kann.

Mark C. Serreze

Auch die arktischen Gletscher zeugen von der Erwärmung. In Alaska sind sie seit fünf Jahrzehnten geschrumpft, und was bestürzender ist: Ihre Rückzugsgeschwindigkeit hat sich in den letzten zehn Jahren verdreifacht. Diese Gletscherschmelze lässt den Meeresspiegel um etwa zwei Millimeter pro Jahrzehnt ansteigen, was einem Prozent des gesamten jährlichen Anstiegs von zwanzig Millimetern entspricht.

Höchstes Ziel der Arktisforscher ist es jedoch, den Zustand des viel größeren und sich langsamer ändernden grönländischen Eisschilds zu bestimmen. Ältere Geländebefunde und Satellitendaten legten ein asymmetrisches Verhalten nahe – mit einer mäßig schrumpfenden West- und einer stabil bleibenden Ostseite.

Neuesten Aufnahmen aus dem All zufolge scheint die Abschmelzgeschwindigkeit jedoch mit der Zeit über den gesamten Eisschild hinweg gestiegen zu sein. Das Gebiet, in dem es in einem bestimmten Sommer taut, hat seit 1978 pro Jahr- ▷

▷ zehnt um sieben Prozent zugenommen, wobei es 2002 einen Allzeitrekord gab. Wenn nicht der winterliche Schneefall dieses kräftige Abtauen in der warmen Jahreszeit ausgleicht, schrumpft der Eisschild wahrscheinlich.

Der Permafrostboden – die ständig gefrorene Schicht unter der Oberfläche – taut ebenfalls. Das bedeutet auch eine ganz konkrete Gefahr für die existierende Infrastruktur: Straßen können aufbrechen und Häuser einstürzen. Im Jahre 1986 veröffentlichten Forscher vom Geologischen Dienst der USA Temperaturprofile von tiefen Bohrlöchern, die auf der Suche nach Erdöl durch den Permafrostboden im Norden Alaskas getrieben worden waren. Zur Oberfläche hin bogen die Kurven ab, was sich am besten durch eine Erwärmung um zwei bis vier Grad Celsius während der vergangenen Jahrzehnte erklären ließ. Vorläufige Ergebnisse aus jüngerer Zeit legen nahe, dass die Oberflächentemperatur seit 1986 zusätzlich um zwei bis drei Grad Celsius zugenommen hat.

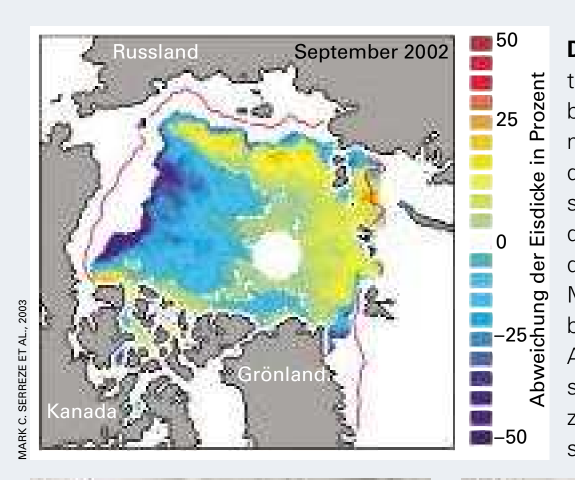
Da der arktische Winter neun Monate im Jahr andauert, beeinflusst die Schneebedeckung den Temperaturstatus des Bodens ebenso stark, wie es die Lufttemperatur tut. Daher spiegeln die Bohrlochdaten fast mit Sicherheit auch eine Veränderung in der Menge und Zeitdauer winterlicher Niederschläge wider. Mehr Schnee bedeutet eine stärkere Isolierung und daher besseren Schutz des Untergrunds vor eisigen Temperaturen. Boden, der im Winter nicht so tief abkühlt, kann sich im Sommer aber stärker erwärmen.

Mit dem tauenden Permafrostboden dürfte auch eine andere bedrohliche Entwicklung zusammenhängen, die kürzlich entdeckt wurde: Innerhalb der letzten sechzig Jahre hat die Wassermenge, die sich aus russischen Flüssen in das Arktische Becken ergießt, um sieben Prozent zugenommen – das entspricht fast dem 2,5fachen Volumen des Bodensees oder dem dreimonatigen Abfluss des Mississippi. Wissenschaftler schreiben die Veränderung einerseits dem erhöhten winterlichen Niederschlag und andererseits einer Erwärmung des Permafrostbodens sowie der aktiven Bodenschicht zu, die jetzt vermutlich mehr Grundwasser transportiert.

Der vermehrte Eintrag von Süßwasser ins Arktische Becken könnte sich gravierend auf das globale Klima auswirken:

Die harten, brühwarmen Fakten

Bei der Erforschung des Klimawandels in der Arktis können sich die Wissenschaftler inzwischen auf langjährige Datenreihen aus verschiedenen Quellen stützen. Die daraus abgeleiteten Muster zeigen einen Erwärmungstrend, der viel stärker ist, als wenn das Klima lediglich von der Kleinen Eiszeit in ein weniger kaltes Temperaturregime zurückkehren würde. Demnach dürfte der vom Menschen verursachte Treibhauseffekt die Hände im Spiel haben.



MARK C. SERREZE ET AL., 2003

Das arktische Meereis erreichte im September 2002 seine bisher geringste Ausdehnung. Die rote Linie markiert die normale Situation zu dieser Jahreszeit. Farben zeigen die Abweichung (in Prozent) der Eisdicke vom langjährigen Mittelwert. In den dunkelblauen Gebieten nördlich von Alaska ist das Eis zum Beispiel dreißig bis vierzig Prozent dünner als üblicherweise um diese Jahreszeit.



U.S. NAVY



KEN TAPE

Die Tundra erlebte in jüngster Zeit eine Invasion von Sträuchern, die auf diesen Fotos als dunkle Streifen zu erkennen sind. Gezeigt ist dasselbe Gebiet nahe dem Chandlar River im Nordwesten Alaskas in den Jahren 1949 und 2001.

LUCY READING; QUELLE: K. STEFFAN UND R. HUFF

Es gibt Hinweise darauf, dass sich in der Vergangenheit immer dann, wenn der Salzgehalt des Nordpolarmeers einen kritischen Wert unterschritt, das weltweite ozeanische Zirkulationsmuster grundlegend änderte. Die Folgen für das Klima sind dramatisch, weil das großräumige marine Zirkulationssystem, zu dem unter anderem der Golfstrom gehört, eines der wichtigsten Förderbänder für Wärme in Richtung Nordpol darstellt.

Die Arktis ergrünt

Mit dem Anstieg der Temperatur und dem Auftauen der Permafrostböden verändert sich zugleich die Vegetationsdecke der Arktis. Schon seit einiger Zeit wissen die Biologen – unter anderem von Experimenten in Treibhäusern –, dass in den borealen Tundren bei einem milderen Klima an Stelle von Gräsern, Moosen und Flechten vermehrt Büsche wachsen sollten. Außerdem ist zu erwarten, dass die Baumgrenze nach Norden wandert. Forscher haben schon lange nach solchen Veränderungen in der Arktis gesucht. Aber Ökosysteme reagieren oft sehr langsam. Klare Indizien gab es deshalb erst in den letzten Jahren – etwa beim Vergleich moderner Fotografien mit solchen von vor fünfzig Jahren. Außerdem ließ sich mit Satellitenaufnahmen belegen, dass der Anteil belaubter Gebiete zunimmt.

Mit der Vegetation ändert sich auch die Rolle der Arktis im weltweiten Kohlenstoffkreislauf. Unter einem Großteil der Tundrengebiete Alaskas und Russlands lagern riesige Mengen an Torf – etwa 2500 Kubikkilometer. Sie beweisen, dass die arktische Tundra lange Zeit unter dem Strich eine Senke für Kohlenstoff war. In den vergangenen Jahren hat sich dies jedoch geändert. Die globale Erwärmung scheint die Arktis zur Nettoquelle für Kohlendioxid und Methan gemacht

Sommer 1971 – 2000

Winter 1971 – 2000

Temperaturabweichung in Grad Celsius pro Jahrzehnt

CHAPMAN & WALSH, 1993, UPDATED TO THE PRESENT BY CHAPMAN

Die Lufttemperaturen in der Arktis sind zwischen 1971 und 2000 um bis zu ein Grad Celsius pro Jahrzehnt gestiegen. Dabei war die Erwärmung im Winter stärker als im Sommer. Grüne und blaue Farbtöne zeigen eine Abkühlung, gelbe und rote eine Temperaturzunahme an.

Gits

Tanu-N

GRÖNLAND

Nasa-U

höchster Punkt

Crawford Point

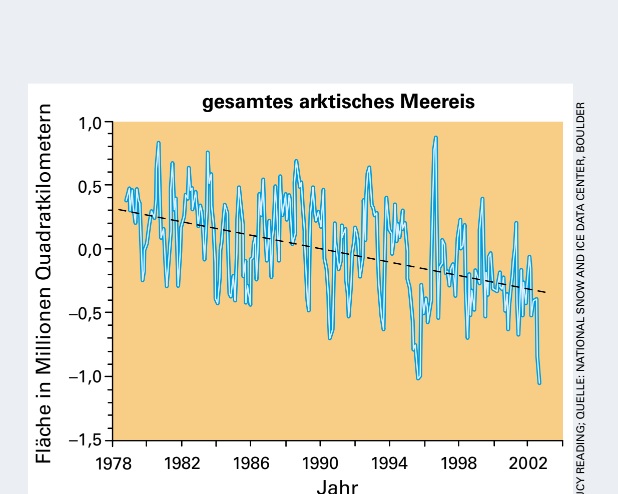
Dye-2

Schmelze

Schmelzgrenze 2000

Forschungsstation

Die Schmelzraten des Grönland-Eisschilds (grau-weiß) stiegen im Sommer 2002 auf Rekordwerte. Abtauzonen sind braun, eisfreie Gebiete grün gefärbt. Nahe der Forschungsstation Dye-2 reichte die Abschmelzregion, die sonst auf die Ränder des Eisschilds begrenzt ist, bis zu dessen Kamm.



Die Messdaten seit 1978 lassen ein auffallendes Schrumpfen der vom Meereis bedeckten Fläche erkennen.

zu haben – die beiden wichtigsten atmosphärischen Treibhausgase, die Wärme zur Erde zurückstrahlen, statt sie in den Weltraum entweichen zu lassen.

Höhere Wintertemperaturen haben einiges zu dieser Entwicklung beigetragen. Wenn die Luft wärmer ist, fällt mehr Niederschlag, ein Teil davon als Schnee, der den Boden isoliert und die Wärme darin zurückhält. Dadurch verlängert sich die Periode, in der die Tundra Kohlendioxid freisetzt. Allerdings kann sich dieser Trend auch wieder umkehren, wenn mehr Gebüsch in der baumlosen Einöde wächst und der Boden im Sommer wegen höherer Temperaturen austrocknet. Denn Pflanzen und insbesondere größere, verholzte Sträucher werden mehr Kohlendioxid einlagern und es so im arktischen Ökosystem festhalten.

Jüngste Untersuchungen lassen in der Tat darauf schließen, dass Stärke und Richtung des arktischen Kohlenstoff-Gleichgewichts von der betrachteten Zeitspanne abhängen. Die Reaktion verändert sich, sobald die Pflanzen sich an die neuen Bedingungen anpassen.

Schmelzendes Packeis

»Das Eis ist ja lächerlich dünn«, dachte ich, als ich schon zum zweiten Mal an diesem Morgen im August 1998 einbrach. Es bestand keine wirkliche Gefahr, jetzt wo persönliche Schwimmhilfen obligatorisch geworden waren. Doch das dünne Eis beunruhigte mich aus anderen Gründen.

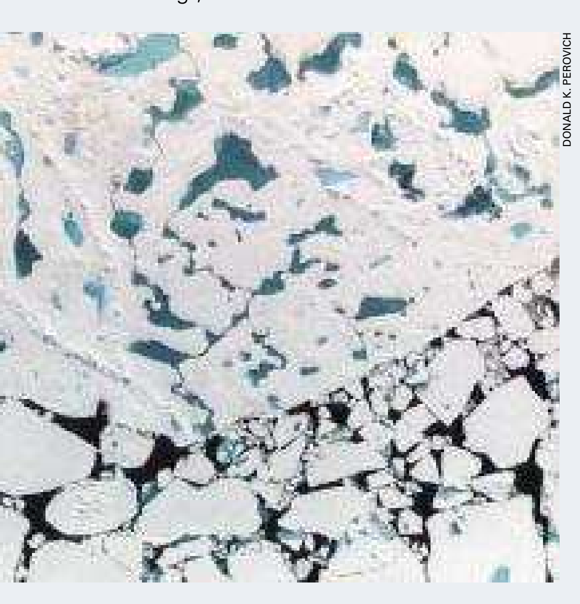
Meine Reise zu dieser Stelle, nur tausend Kilometer vom Nordpol entfernt, hatte zehn Monate zuvor an Bord des Eisbrechers Des Groseilliers begonnen, den wir absichtlich ins Packeis einfrieren ließen, um jahrelang mit ihm zu driften. Unterwegs wollten wir die Rückkopplungen durch die Eis-Albedo und die Wolken untersuchen. Schon zu Beginn der Reise hatte ich mich über die geringe Dicke des Eises gewundert. Jetzt, nach einer viel länger als erwarteten sommerlichen Abschmelzperiode, hatte sie sich weiter verringert, obwohl wir stetig nach Norden gedriftet waren. Ich fragte mich ernsthaft, was zuerst enden würde: der Sommer oder das Eis. Noch wusste ich nicht, dass 1998 die Eisbedeckung im gesamten westlichen Nordpolarmeer ein Rekordminimum erreichte. Zum Unglück für das langfristige Überleben des Meereises wurde dieser Negativrekord 2002 mit Leichtigkeit unterboten. Donald K. Perovich

Unter allen von uns erfassten Veränderungen ist der Schwund der arktischen Meereisdecke weitaus am alarmierendsten. Genaue Untersuchungen ergaben, dass das von Eis bedeckte Gebiet seit Beginn ▷

Ein komplexes Beziehungsgeflecht

Das Eis-Albedo-Feedback ist wohl das wichtigste unter den Rückkopplungssystemen, die in der Arktis existieren und die Vorhersage der künftigen Entwicklung erschweren. Land, Ozean und Eis reflektieren jeweils einen bestimmten Teil des auftreffenden Sonnenlichts, das daraufhin in den Weltraum entweicht und nicht zur Erwärmung der Erdoberfläche beiträgt. Diesen Prozentsatz nennt man Albedo. Beträgt sein Wert 1, wird das Licht vollständig reflektiert; eine Oberfläche mit einer Albedo von 0 absorbiert dagegen die gesamte Sonnenstrahlung. Überraschenderweise deckt das Nordpolarmeer fast die ganze Spanne ab. Wo es gefroren und schneebedeckt ist, hat es die höchste Albedo unter allen natürlichen Materialien (etwa 0,85), an eisfreien Stellen dagegen die niedrigste (etwa 0,07).

Im späten Frühjahr ist das Packeis von Schnee bedeckt und strahlend weiß. Folglich reflektiert es das meiste einfallende Sonnenlicht. Wenn dann ein Teil des Eises abtaut und der Eisrand sich zurückzieht, tritt dunkles, absorbierendes Meerwasser an die Stelle der stark reflektierenden, schneeweißen Oberfläche. Außerdem erzeugt der schmelzende Schnee auch im Inneren der Meereisdecke wassergefüllte Tümpel, die ebenfalls eine niedrige Albedo haben. Durch die vermehrte Absorption von Sonnenlicht steigt die Temperatur, sodass sich der Schmelzprozess beschleunigt, und so weiter.



DONALD K. PEROVICH

Falls das Eis-Albedo-Feedback isoliert abliefe, ließe sich seine Wirkung auf das weltweite Klima vielleicht heute schon vorhersagen. Doch das trifft nicht zu. Vielmehr überlagern sich viele – teils positive, teils negative – Rückkopplungen, und ihr Netto-Effekt ist schwierig abzuschätzen. Ein Beispiel: Bei verminderter Albedo steigt die Lufttemperatur, doch eine wärmere Atmosphäre kann mehr Wasserdampf aufnehmen, weshalb die Wolkenbedeckung zunimmt. Wolken wirken einerseits wie ein Sonnenschirm, was zur Abkühlung führt. Andererseits halten sie aber auch wie eine Decke langwellige Strahlung fest, die von der Erdoberfläche ausgeht, was eine Erwärmung bewirkt. Im Winter sind die Folgen in der Arktis eindeutig: kein Sonnenlicht, kein Schirm, nur die Decke – das Wolken-Feedback ist positiv.

Doch was passiert im Sommer, wenn die Sonne Tag und Nacht scheint? Feldstudien haben gezeigt, dass die Rückkopplung von der Art der Wolken abhängt. Bei hohen, dünnen Cirri, die vorwiegend aus Eiskristallen bestehen, überwiegt der Schirmeffekt, und das Wolken-Strahlungs-Feedback ist negativ. Aber bei niedrigen Wolken aus Wassertröpfchen, wie sie im Sommer vorherrschen, dominiert die Deckenwirkung, und die Rückkopplung ist positiv. Tatsächlich schmilzt, wenn solche niedrigen Wolken den Himmel verdunkeln, mehr Eis ab als an sonnigen Tagen.

Die Wissenschaftler versuchen jetzt herauszufinden, welche Feedbacks im komplexen Beziehungsgeflecht der Arktis die größte Beachtung verdienen. Sicherlich sind es solche wie die Eis-Albedo-Rückkopplung, die schon in Gang gekommene Veränderungen verstärken und beschleunigen – und das System so schließlich zum Kippen bringen können.

◀ Löchrige Eisdecke: Süßwassertümpel aus abgetautem Schnee erscheinen aus der Vogelperspektive türkisfarben, Stellen mit offenem Meerwasser dagegen fast schwarz. Flüssiges Wasser in beiden Formen absorbiert viel mehr Sonnenlicht als das helle, schneebedeckte Eis.

▷ der Satellitenaufzeichnungen 1972 um etwa drei Prozent pro Jahrzehnt geschrumpft ist. Wo Zeit in Jahrhunderten oder -tausenden gemessen wird, ist das rasant. Das Meereis bedeckt ein Gebiet ungefähr von den Ausmaßen der USA. Damit entsprechen drei Prozent einem Areal von der Größe der Bundesstaaten Colorado und New Hampshire zusammengenommen, in denen zwei von uns (Perovich und Serreze) leben. Noch dramatischer ist die Ausdünnung des Eises: Messungen von U-Booten aus ergaben teils vierzig Prozent Verlust in den letzten Jahrzehnten. Einigen Klimamodellen zufolge wird das Nordpolarmeer ab dem Jahr 2080 im Sommer eisfrei sein.

Zwar lässt das abschmelzende Meereis im Gegensatz zu abtauenden Gletschern den Meeresspiegel nicht steigen, da es ohnehin schon schwimmt. Aus zwei anderen Gründen aber bietet es Anlass zu Besorgnis. Aus lokaler Sicht ginge ein einzigartiges Ökosystem mit Eisbären, Robben und wandernden Walen zu Grunde. Im globalen Maßstab brächte ein eisfreies Nordpolarmeer dem Eis-Albedo-Feedback ein jähes Ende – viel mehr Sonnenlicht würde absorbiert und dadurch zunächst die Arktis und dann der gesamte Planet erwärmt.

Die Rolle des Treibhauseffekts

Die schrumpfende Treibeisdecke ist Geschäftsleuten, Touristen und Politikern keineswegs entgangen. Schon gibt es ernsthafte Diskussionen über die Möglichkeit, Schiffsfracht von Asien nach Europa über das Nordpolarmeer zu transportieren, wenn die sagenhafte Nordwestpassage wegen des Klimawandels vielleicht schon bald eine brauchbare Schifffahrtsroute sein wird. Der norwegische Polarforscher Roald Amundsen benötigte mehr als drei Jahre – von 1903 bis 1906 – für die erste erfolgreiche Durchquerung der Passage. Viele Forscher vor ihm waren bei dem Unternehmen ums Leben gekommen. In den letzten Jahren haben dagegen mehr als hundert Schiffe diese Route gemeistert; einige russische Eisbrecher wurden eigens für den lukrativen Transport von Touristen aufpoliert. Inzwischen gibt es auch Schiffstouren zum Nordpol. Sie wären unter den frostigeren Bedingungen vor hundert Jahren selbst mit Eisbrechern undenkbar gewesen.

Die beunruhigenden Veränderungen in der Arktis werfen zwangsläufig die Frage auf, ob wir immer noch aus der Kleinen Eiszeit auftauchen oder ob inzwi-

Winde des Wandels

Schon die Wikinger wussten, dass milde Winter in Nordeuropa tendenziell harte Winter in Südgrönland bedeuten und umgekehrt. Heute ist klar, dass diese Klimaschaukel weitere Gebiete erfasst und mit der so genannten Nordatlantischen Oszillation (NAO) zusammenhängt. Dieses atmosphärische Zirkulationsmuster wird bestimmt durch die Beziehung zwischen einem ausgedehnten Tiefdruckgebiet, das typischerweise bei Island liegt, und einer bedeutenden Hochdruckzone bei den Azoren. Wenn die Druckdifferenz zwischen beiden hoch ist, befindet sich die NAO in ihrem positiven, anderenfalls im negativen Modus.

Um das Azoren-Hoch bläst die Luft im Uhrzeigersinn, um das Island-Tief jedoch dagegen. Befindet sich die NAO im positiven Modus, wehen die Winde um die beiden Luftdruckgebilde stärker als normal. Warme Luft aus dem Süden strömt dann über Nordeuropa und das nördliche Eurasien. Zugleich schaufelt dasselbe Zirkulationssystem kalte Luft von der nördlichen Arktis über Teile von Grönland, den Nordatlantik und den Nordosten Nordamerikas. Im negativen Modus schwächen sich diese Luftströmungen ab oder kehren sich zeitweise sogar um, was zu ungefähr dem entgegengesetzten Temperaturmuster führt. Etwa seit 1970 steckte die NAO im Winter großenteils in ihrem positiven Modus fest. Das macht zumindest teilweise verständlich, warum in den letzten dreißig Jahren eine großräumige Erwärmung über Alaska, Westkanada und Eurasien zu beobachten war, aber eine Abkühlung in Ostkanada und Südgrönland. Dieses Windmuster dürfte auch die erhöhten Niederschläge im Norden Eurasiens verursacht und zum Verlust von Meereis in der westlichen Arktis beigetragen haben.



Die Nordatlantische Oszillation – hier in ihrem positiven Modus – beeinflusst das Klima der Nordhalbkugel.

schen etwas völlig anderes passiert. Sind die geschilderten Vorgänge Teil eines natürlichen Temperaturzyklus, der nur länger anhält als erwartet? Oder bedeuten sie, dass die zunehmende Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre mittlerweile die Klimaentwicklung bestimmt?

Das verwirrende Netz von Rückkopplungen gestaltet diese Frage äußerst kompliziert – und wir wissen noch nicht genug, um sie eindeutig beantworten zu können. Doch es gibt wahrlich Grund zur Besorgnis.

Was auch das Abschmelzen und Auftauen in der Arktis verursacht, so hat es bereits weltweit eine Kaskade von Folgeprozessen ausgelöst, die sich selbst dann noch fortsetzen werden, wenn die Erwärmung an den Polen plötzlich und unerwartet zum Stillstand käme. Stellen Sie sich das Klima als großen, runden Felsblock vor, der auf unebenem Gelände thront. Die Bestandsaufnahme des heutigen Zustands sagt uns, dass er ein wenig angeschubst wurde – entweder durch einen natürlichen Klimazyklus oder durch menschliche Aktivität – und dadurch ins Rollen gekommen ist. Auch wenn der Schub aufhört, wird er weiterrollen und schließlich an einer anderen Stelle zum Stillstand kommen.

Um die Vorgänge in der Arktis umfassend aufzuklären und nicht nur darauf reagieren, sondern sie auch vorhersagen zu können, koordinieren jetzt mehr als ein Dutzend US-Bundesbehörden ihre Arktisforschung in einem Programm namens Search (*Study of Environmental Arctic Change*, Untersuchung der Umweltveränderung in der Arktis). Erste Ergebnisse lassen hoffen, dass es gelingt, das Wechselspiel der eng verwobenen Rückkopplungsschleifen zu entwirren, die das Klima der Arktis und somit der Erde prägen. Zum Beispiel hilft ein jüngst entdecktes System der Windzirkulation das zuvor rätselhafte Muster zu erklären, nach dem der Temperaturanstieg räumlich verteilt ist (siehe Kasten oben). Von großer Bedeutung ist auch, dass zuverlässige Messreihen über die Klimaentwicklung jetzt dreißig bis fünfzig Jahre zurückreichen.

Dank dieser Aufzeichnungen und neuer Erkenntnisse sollte bald klar werden, ob die Transformation der Arktis ein natürlicher Trend ist, der mit dem Ende der Kleinen Eiszeit zusammenhängt, oder ob sie bedenklichere Ursachen hat. Bis dahin gilt es vor allem, möglichst schnell das Zusammenwirken der diversen Rückkopplungsschleifen im arktischen Klimasystem zu enträtseln. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE





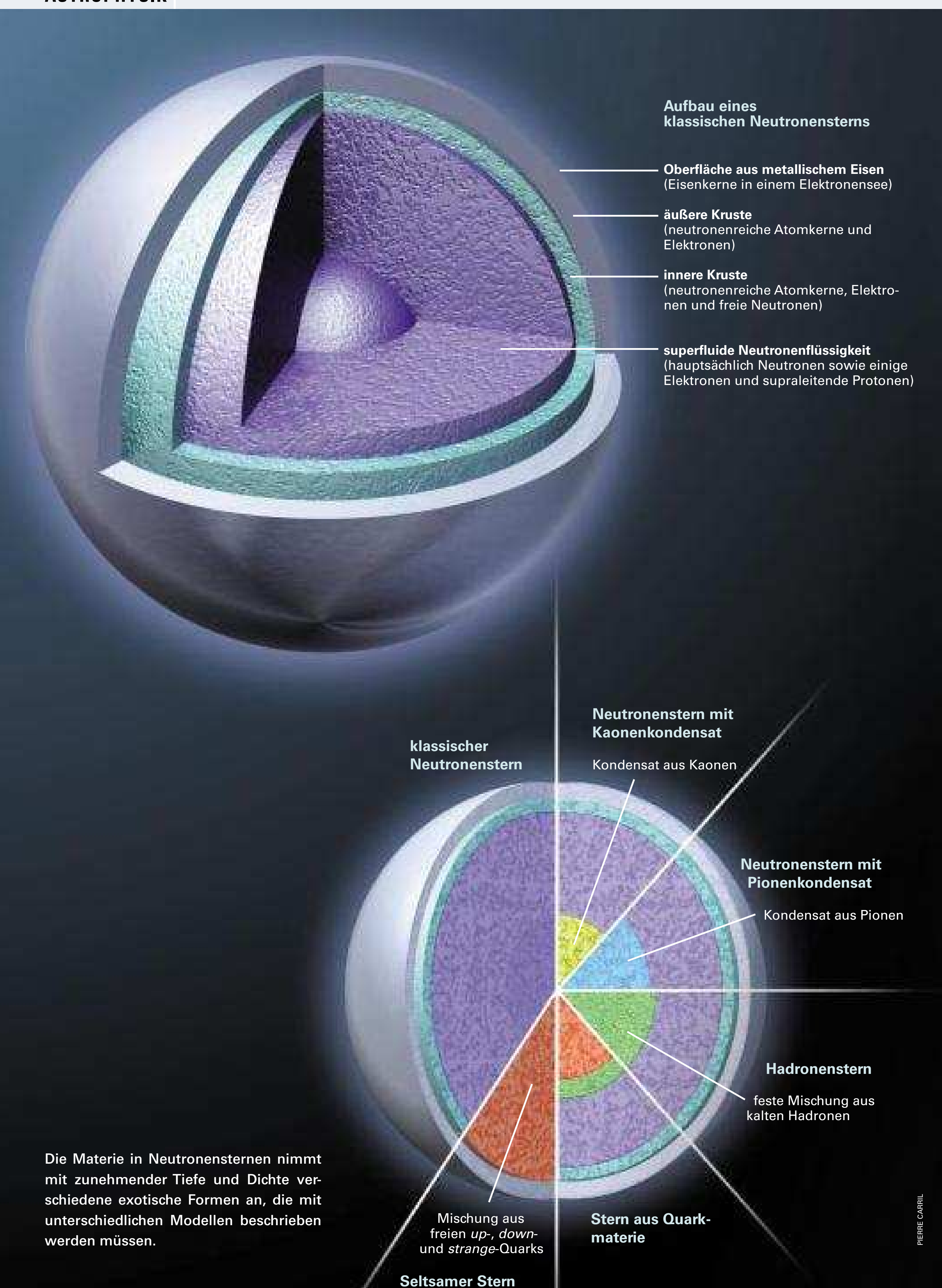
Matthew Sturm (links) hat beim U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory in Alaska über ein Dutzend winterliche Expeditionen in der Arktis Alaskas geleitet, so jüngst eine 1200 Kilometer lange Durchquerung des Gebiets per Schneemobil. **Donald K. Perovich** (Mitte) befasst sich beim U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory in New Hampshire mit dem Mechanismus der Eis-Albedo-Rückkopplung. Er war Chefwissenschaftler auf einem Eisbrecher, der sich jahrelang mit dem arktischen Packeis treiben ließ. **Mark C. Serreze** erforscht seit 1986 beim National Snow and Ice Data Center der Universität von Colorado in Boulder den Klimawandel in der Arktis und die Interaktionen zwischen Meereis und Atmosphäre.

The surface heat budget of the Arctic Ocean (SHEBA). Sonderteil in: Journal of Geophysical Research, Bd. 107, Nr. 15; Oktober 2002

Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. Von Mark Serreze et al. in: Climatic Change, Bd. 46, S. 159 (2000)

Year on ice gives climate insights. Von D. K. Perovich et al. in: EOS, Transactions of the American Geophysical Union, Bd. 80, Nr. 481, S. 485 (1999)

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Die Materie in Neutronensternen nimmt mit zunehmender Tiefe und Dichte verschiedene exotische Formen an, die mit unterschiedlichen Modellen beschrieben werden müssen.

Neutronensterne: ultradichte Exoten

Wissenschaftler müssen sich der gesamten Palette physikalischer Gesetzmäßigkeiten bedienen, um die Vorgänge im Innern dieser kompakten Himmelskörper aufzuklären.

Von Jérôme Novak

Vor 150 000 Jahren beendete ein Riesenstern in der Großen Magellanschen Wolke sein bis dahin unauffälliges Dasein in einer gigantischen Explosion. Der Lichtblitz, der von diesem spektakulären Ereignis kündete, traf unseren Heimatplaneten im Jahr 1987. Die Astronomen konnten so die erste mit bloßem Auge sichtbare Supernova seit der Zeit von Tycho Brahe und Johannes Kepler beobachten. Der explodierende Stern – Supernova 1987 A genannt – schleuderte seine äußeren Gasschichten mit hoher Geschwindigkeit ins All. Doch sein innerster Teil ist als extrem kompakter Neutronenstern übrig geblieben. Dessen Dichte ist so groß, als hätte man die Sonne auf den Umfang einer Großstadt zusammengepresst.

Wenngleich Neutronensterne mitunter als »Sternleichen« bezeichnet werden, sind sie dennoch nicht inaktiv. Ein solcher Himmelskörper – dichter als ein Atomkern – dreht sich mehrere zehntausend Mal pro Minute um sich selbst. Zudem ist sein Magnetfeld millionenfach stärker als alles, was wir auf der Erde erzeugen können. Die Materie in Neutronensternen ist somit extremen physikalischen Bedingungen unterworfen. Sterne mit mehr als dem Zehnfachen der Sonnenmasse, die also noch schwerer sind als der zur Supernova 1987 A gewordene, enden als Schwarze Löcher. Während in diesen seltsamen Gebilden die Gravitation dominiert, sind in Neutronensternen alle vier Grundkräfte zu berücksichtigen: Gravitation, Elektromagnetismus, schwache Wechselwirkung und starke Wechselwirkung. Erst heutzutage – siebzig Jahre, nachdem die Wissenschaft auf diese exotischen Objekte aufmerksam geworden ist – sind theoretische Physik und Beobachtungstechnik fortgeschritten genug, um den Aufbau von Neutronensternen einigermaßen modellieren zu können.

Die Geschichte der Neutronensterne beginnt 1932 mit der Entdeckung des namensgebenden Teilchens, des Neutrons, durch den englischen Physiker James Chadwick. Angeblich hatte sein sowjetischer Fachkollege Lew Landau noch an dem Tag, an dem er die Entdeckungsmeldung erhielt, die Idee, es könne ultradichte Sterne geben, die im Wesentlichen aus diesen neutralen Materiebausteinen bestehen.

Im kalifornischen Pasadena spekulierten zu jener Zeit die aus Deutschland und der Schweiz stammenden Astronomen Walter Baade und Fritz Zwicky, ob es nicht noch heftigere Sternexplosionen geben könne als die bis dahin bekannten Novae. Völlig aus Neutronen aufgebaute Sterne als Produkt der von ihnen so genannten Supernovae kamen ihnen für ihre Hypothese gerade recht. Als J. Robert Oppenheimer und sein Student George M. Volkoff in Berkeley nach der Energiequelle ganz normaler Sterne suchten, berechneten sie 1939 auch die ersten Modelle für Neutronensterne. Doch als man langsam die thermonukleare Fusion zu verstehen begann, gerieten die Arbeiten dieser Pioniere aus dem Blick und die Neutronensterne in Vergessenheit – kaum jemand vermochte sich damals vorzustellen, wie man solch kleine und kompakte Himmelskörper beobachten könne.

Dies alles änderte sich 1967, als Jocelyn Bell und ihr Doktorvater Antony Hewish mit einem speziellen Radioteleskop in Cambridge einen neuen Himmelskörper entdeckten, der sehr regelmäßige Radiopulse aussendet: einen Pulsar. Schon kurz darauf zeigte sich, dass diese neue Objektklasse nichts anderes darstellt als rotierende Neutronensterne, deren starkes Magnetfeld wie der Scheinwerfer eines Leuchtturms den Kosmos durchstreift. Im folgenden Jahr bestätigte die Entdeckung des Pulsars PSR B0531+21 im Zentrum des Krebsnebels die Hypo- ▷

IN KÜRZE

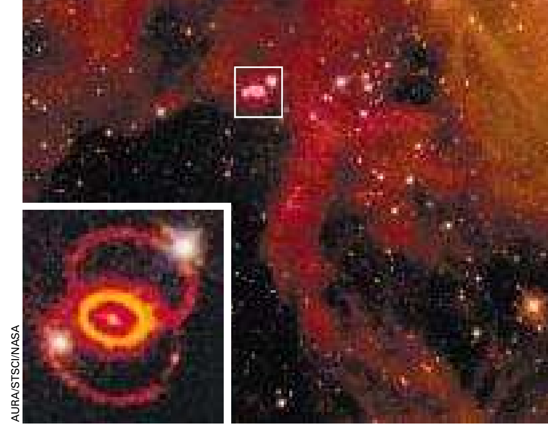
- Neutronensterne erreichen die **billiardenfache Dichte von Wasser** – so, als komprimierte man die Cheops-Pyramide auf die Größe eines Stecknadelkopfs.
- Unter solch extremen Bedingungen verhält sich die Materie, als wäre sie tiefgefroren, auch wenn der Stern mehrere hundert Millionen Grad heiß ist.
- Um den Aufbau von Neutronensternen zu beschreiben, müssen die Wissenschaftler in ihren Modellen **Astro- und Teilchenphysik vereinen.**

these von Baade und Zwicky, nach der Neutronensterne bei Sternexplosionen entstehen. Als irdische Detektoren dutzende Neutrinos auffingen, die von der Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke stammten, ließ sich diese These auch experimentell erhärten. Denn Neutrinos sind ein starker Hinweis auf die »Neutronisierung« der Sternmaterie während einer Supernovaexplosion: Protonen und Elektronen verschmelzen zu Neutronen und geben dabei Neutrinos ab. Man nennt diesen Prozess den inversen Beta-Zerfall (Bild auf S. 39).

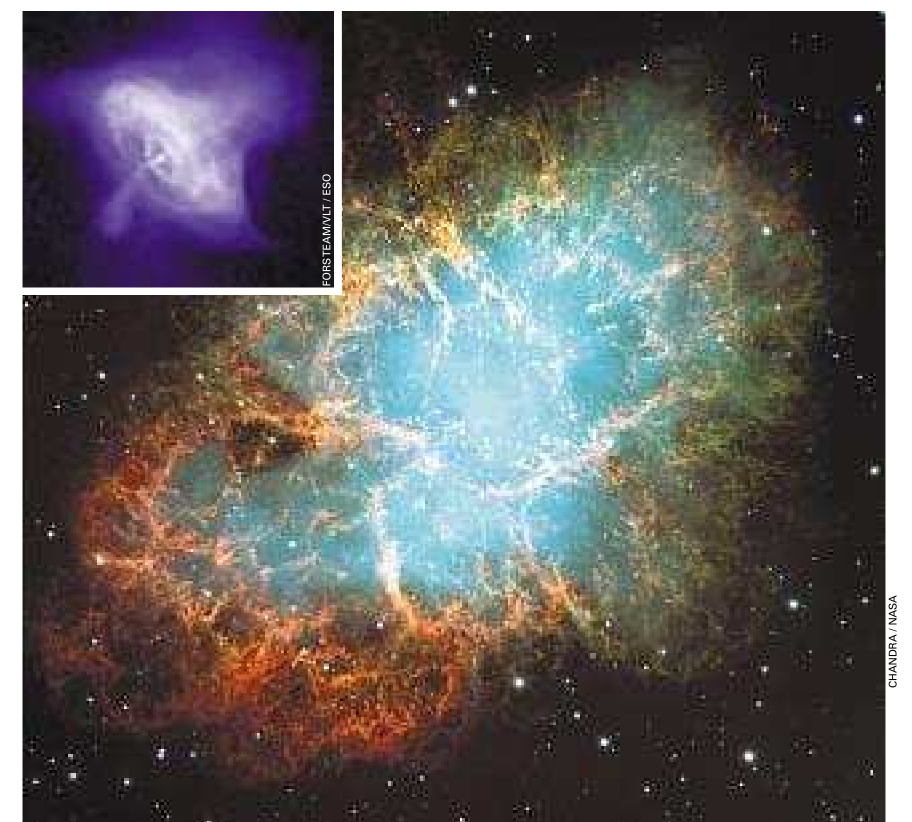
Bis heute kennen die Astronomen 1300 Pulsare. Die in dieser Form beobachtbaren Neutronensterne (also diejenigen, deren Strahlenbündel regelmäßig unsere Sichtlinie kreuzt) senden Pulse stabiler Amplitude aus. Dies belegt, dass die Emission der Signale mit der Rotation der Quelle verbunden ist. Jedoch beobachtet man im Lauf der Zeit eine stetige Abnahme der Rotationsfrequenz.

Demzufolge verliert der Pulsar mit den Signalen Energie. Der schnellste bekannte Pulsar, PSR B1937+21, hat eine Rotationsperiode von 1,56 Millisekunden, dreht sich also 640 Mal pro Sekunde um seine Achse. Damit der Himmelskörper bei einer solchen Kreiselgeschwindigkeit nicht von der Fliehkraft zerrissen wird, muss seine Dichte diejenige der Atomkerne übersteigen. Dieser Befund bestätigt, dass es sich um einen aus komprimierten Neutronen zusammengesetzten Stern handelt, quasi um einen »Atomkern« in makroskopischen Dimensionen. Astronomen vermuten, dass die Radiowellen von einem starken Magnetfeld ausgehen, das von der Rotation des Gestirns mitgerissen wird. Aus der beobachteten Abbremsung kann man den Energieverlust durch Abstrahlung der Pulse und somit die Stärke des Felds bestimmen. Für das Feld des Krebsnebelpulsars ergeben sich mehrere hundert Millionen Tesla. Zum Vergleich: Das Magnetfeld der Erde beträgt etwa 10^{-5} Tesla, in speziellen Labors können Felder von hundert Tesla erzeugt werden.

Das Supernovamodell von Baade und Zwicky erklärt die schnelle Rotation und das starke Magnetfeld der Neutronensterne auf einfache Weise. Wenn ein rotierender Stern – beziehungsweise sein Zentralbereich – durch die Explosion komprimiert wird, bleibt sein Drehimpuls erhalten: Wie eine Eisläuferin, die ihre Arme nah an den Körper nimmt, erhöht er seine Drehgeschwindigkeit. Das Magnetfeld verstärkt sich dabei ebenfalls um ein Vieltausendfaches.


AURA/STSCI/NASA

Die Supernova 1987A: Die Explosion eines Riesensterns in der Großen Magellanschen Wolke erzeugte einen Neutrinoschauer, der auf der Erde nachgewiesen werden konnte – ein direkter Beleg dafür, dass sich ein großer Teil der Protonen und Elektronen zu Neutronen und Neutrinos verbanden.


FORSTEAM/VLT / ESO
CHANDRA / NASA

Der Krebsnebel ist ein Relikt der 1054 beobachteten Supernova. Inmitten des Nebels befindet sich ein Pulsar – der Überrest eines Sterns, der bei seiner Explosion die Gasschlieren hinterlassen hat. In der Röntgenaufnahme des Pulsars (kleines Bild) vermutet man Jets, die mit der Rotation des Sterns den Himmel durchstreifen und die auf der Erde beobachtbaren Radiopulse aussenden.

Die Rechnungen von Oppenheimer und Volkoff zeigen, dass es eine maximale Masse gibt, jenseits derer der Supernovarest nicht zu einem Neutronenstern, sondern weiter zu einem Schwarzen Loch kollabiert. Denn dann kann selbst der nach außen wirkende Druck der Neutronen der Schwerkraft nicht standhalten. Diese Obergrenze von etwa 3,2 Sonnenmassen ist für die Theoretiker sehr wichtig, da sie die verschiedenen Möglichkeiten, wie sich Neutronensterne bilden können, einschränkt. Eine weitere Obergrenze gibt es für die Rotationsgeschwindigkeit eines solchen Objekts. Selbst das Magnetfeld kann nicht beliebig groß werden – übersteigt der magnetische Druck den Massendruck, so wird der Stern instabil.

Um ein Modell für Neutronensterne zu erstellen, müssen wir wissen, wie ihre Materie auf Druck- und Temperaturänderungen reagiert. Da wir nicht alle einzelnen Teilchen des Sterns berücksichtigen und ihre unzähligen Wechselwirkungen berechnen können, fassen wir ihre mikroskopischen Eigenschaften in der so genannten Zustandsgleichung zusammen. Diese Formel verknüpft die Dichte mit dem Druck und der Temperatur im Gleichgewichtszustand.

Wenn ein Neutronenstern entsteht, beträgt seine Temperatur im Innern zunächst über 100 Milliarden Kelvin. Doch ein Großteil dieser Energie wird binnen kurzem in Form von Neutrinos abgestrahlt. Schon nach einem Jahr ist

die Innentemperatur auf eine Milliarde Kelvin gesunken. Dies mag noch immer als extrem heiß erscheinen, doch relativiert sich diese Sicht, wenn wir die quantenmechanischen Eigenschaften der Neutronen betrachten.

Diese Teilchen unterliegen nämlich als Fermionen dem Pauli-Prinzip, wonach sich zwei Fermionen nicht im gleichen Quantenzustand befinden können. Energetisch betrachtet müssen sich die Neutronen also übereinander stapeln. Selbst wenn ein System aus Fermionen die Temperatur null Kelvin hätte, könnten sich die Teilchen nicht alle auf dem niedrigsten Energieniveau ansammeln, sondern müssten auf höhere Niveaus ausweichen – bis zu einer Grenzenergie, die nach dem italienischen Physiker Enrico Fermi benannt ist. In der Realität – bei endlichen Temperaturen – können manche Teilchen auch Zustände oberhalb der Fermi-Energie besetzen.

Tiefgefroren bei einer Milliarde Grad

Die Fermi-Energie ist umso höher, je größer die Teilchenzahl ist. Für Neutronensterne mit ihrer hohen Teilchendichte erreicht sie ungefähr 10^{34} Joule, was einer Temperatur von 100 Milliarden Kelvin entspricht. In einem neu gebildeten Neutronenstern, der ungefähr diese Temperatur aufweist, befindet sich deshalb ein gewisser Anteil der Teilchen in angeregten Zuständen oberhalb der Fermi-Energie. Hat sich der Neutronenstern nun auf eine Milliarde Kelvin abgekühlt, beträgt seine Temperatur – und somit die mittlere Energie der Teilchen – nur noch ein Hundertstel der Fermi-Energie, sodass fast alle Teilchen Energieniveaus unterhalb dieser Grenze einnehmen. Dieser Zustand unterscheidet sich nur wenig von dem bei der Temperatur null. Neutronensterne verhalten sich folglich wegen ihrer extremen Dichte wie tiefgefrorene Körper, wenngleich ihre Temperatur eine Milliarde Kelvin beträgt.

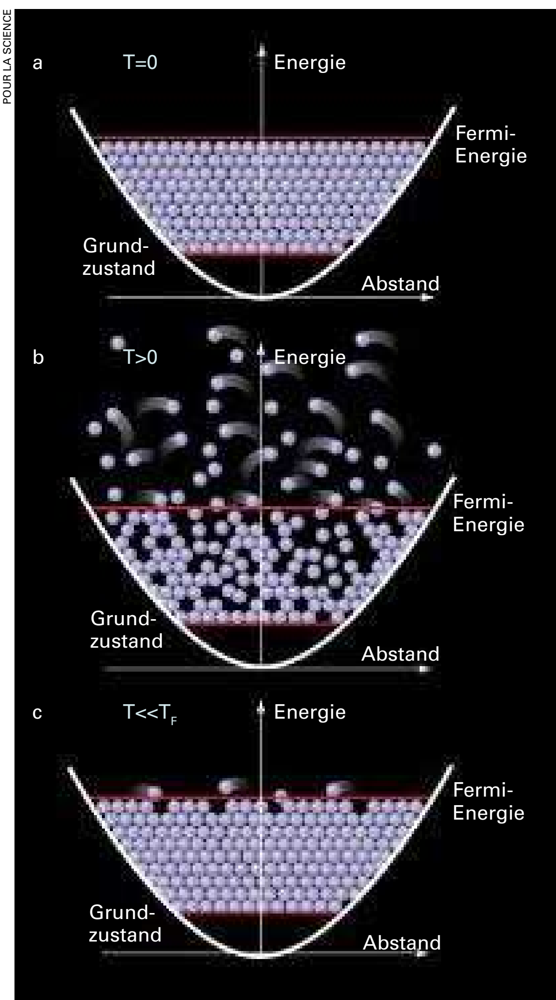
Nun ist noch die Veränderung des Drucks in Abhängigkeit von der Dichte zu bestimmen. Dazu betrachten wir, wie die Bestandteile der Materie bei nuklearen Dichten miteinander reagieren. Wir begegnen hierbei allen fundamentalen Teilchen und Kräften: den Leptonen (insbesondere Elektronen und deren Neutrinos), die der schwachen Wechselwirkung unterliegen, und den Quarks (namens *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom* und *top*), deren Verhalten von der starken Wechselwirkung bestimmt wird. Ein Quark und ein Antiquark können sich zu einem Meson zusammenlagern, während je drei Quarks ein so genanntes Baryon bilden.

Zu der letztgenannten Teilchengruppe gehören alle Grundbausteine der gewöhnlichen Materie, die Protonen (die aus zwei *up*- und einem *down*-Quark bestehen) und die Neutronen (zusammengesetzt aus einem *up*- und zwei *down*-Quarks). Baryonen folgen dem Pauli-Prinzip (sind also Fermionen), während Mesonen alle im gleichen Quantenzustand kondensieren können (man nennt derartige Teilchen Bosonen). Die schwache Wechselwirkung äußert sich in Form des Beta-Zerfalls (ein Neutron zerfällt in ein Proton, ein Elektron sowie ein Antineutrino) und seiner inversen Reaktion (ein Proton und ein Elektron verbinden sich zu einem Neutron und geben ein Neutrino ab). Da beide Prozesse permanent stattfinden und dabei die Neutronen-, Protonen- und Elektronenpopulationen zahlenmäßig stabil bleiben, liegt ein Reaktionsgleichgewicht vor. In erster Näherung bestehen Neutronensterne somit aus Neutronen, Protonen und Elektronen im Beta-Gleichgewicht, denn die Neutrinos werden ins All abgestrahlt.

Deutlich wird das bei einem mittelgroßen Neutronenstern: Er hat vierzig Prozent mehr Masse als die Sonne, jedoch nur einen Durchmesser von etwa zwanzig Kilometern und ist kalt. An seiner Oberfläche ist der Druck null. Deshalb gibt es dort infolge des Beta-Zerfalls keine freien Neutronen. Die Materie liegt in Form von Eisen vor, dessen Kern von allen Elementen der stabilste ist. Eisen ist metallisch, seine Atomkerne bilden also ein kompaktes Kristallgitter, das von einem See freier Elektronen durchflutet wird. Wegen der enormen Schwerkraft ist die Oberfläche dieser Metallschale sehr glatt – etwaige »Berge« wären höchstens einige Millimeter hoch.

Die Eisenschale ist ungefähr zehn Meter dick, und ihre Dichte steigt nach innen rasch an. Je höher die Dichte wird, desto näher pressen sich die Elektronen an die Atomkerne. Wenn sie schließlich in Reichweite der schwachen Wechselwirkung kommen, werden sie von den Protonen der Atomkerne eingefangen, und es bilden sich Neutronen. Infolgedessen sind die Atomkerne umso stärker mit Neutronen angereichert, je tiefer sie sich in der Metallschicht befinden. Schließlich wird die Anreicherung so groß, dass Neutronen aus den Atomkernen herauszutröpfeln beginnen.

Dieses Phänomen markiert den Übergang zur inneren Kruste, die ein bis zwei Kilometer dick ist und deren Dichte etwa ein Tausendstel der Atomkerndichte beträgt. Sie trennt die äußere kristalline Kruste, die aus mit Neutronen ▷



▶ **Das Pauli-Prinzip verbietet Teilchen mit halbzahligem Spin, den gleichen Quantenzustand einzunehmen. Bei einer Temperatur von null Kelvin (a) würden sich die Teilchen übereinander stapeln, bis sie die so genannte Fermi-Energie (T_F) erreichen, die wegen der extremen Teilchendichte sehr hoch ist. Bei hoher Temperatur (b) besetzen viele Teilchen Niveaus oberhalb der Fermi-Energie. Wenn die Temperatur jedoch deutlich unterhalb der Fermi-Energie liegt, ähnelt die Teilchenkonfiguration derjenigen bei Temperatur null (c) – der Stern verhält sich wie ein tiefgefrorener Körper, auch dann, wenn seine Temperatur eine Milliarde Kelvin beträgt.**

angereicherten Atomkernen besteht, von der noch tiefer liegenden Flüssigkeit aus Neutronen, Protonen und Elektronen im Beta-Gleichgewicht.

Der Aufbau der inneren Kruste gleicht italienischen Nudelgerichten: Zunächst entstehen im festen Kristall kleine flüssige Bereiche. Größere dieser Zonen zerplatzen, treffen wieder zusammen und formen »Spagetti« aus Neutronenflüssigkeit. Diese »Spagetti« wiederum bilden eine Art »Lasagne-Struktur« aus, in der sich flüssige Schichten aus Neutronen und kristalline Schichten aus Atomkernen abwechseln. Die Flüssigkeitsschichten werden in dem Maße dicker, wie die noch verbliebenen kristallinen Bereiche immer weiter zurückgedrängt werden.

Quarksuppe in Seltsamen Sternen

Ab dieser Tiefe, in der die Dichte derjenigen von Atomkernen gleicht, besteht der Stern vor allem aus Neutronen, Protonen und Elektronen. Auch Myonen sind vorhanden. Ist die Temperatur des Sterns niedrig genug, werden die Neutronen superflüssig und die Protonen supraleitfähig. Was in noch größerer Tiefe vor sich geht, wenn die Dichte das Dreifache der Atomkerndichte übersteigt, entzieht sich unserer Kenntnis.

Astrophysiker vermuten jedoch, dass dort exotische Teilchen gebildet werden wie etwa Hyperonen, die *strange*-Quarks enthalten. Auch Pionen oder Kaonen könnten zugegen sein. Diese Partikel sind Bosonen, können also in einem gemeinsamen Quantenzustand kondensieren. Ein solches Bose-Einstein-Kondensat würde dem Gewicht der höheren Schichten kaum Gegendruck entgegensetzen können. Sollte sich in einem genügend massereichen Neutronenstern tatsächlich ein solches Kondensat ausbilden, könnte er einen erneuten Kollaps erleiden, sodass ein Schwarzes Loch entstünde.

Wenn die Dichte im Zentrum des Sterns hoch genug wird, kann sich die Materie schließlich in eine Suppe aus freien Quarks umwandeln: Ähnlich wie zuvor Neutronen aus den Atomkernen aussickerten, treten nun Quarks aus den Mesonen und Baryonen aus und bilden eine Quarkflüssigkeit. Da der Stern neben den *up*- und *down*-Quarks, die wir von der gewöhnlichen Materie kennen, auch *strange*-Quarks enthält, sprechen die Astronomen von einem Seltsamen Stern.

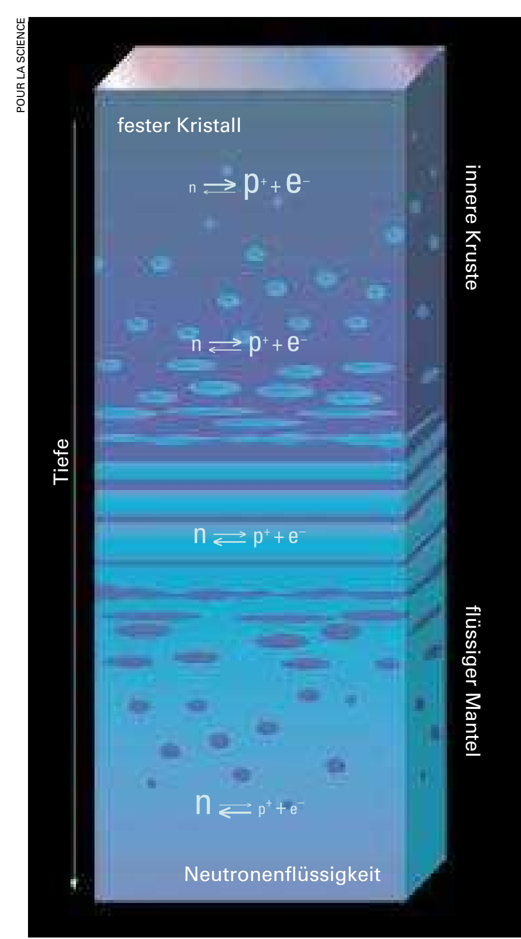
Die Kräfte zwischen Quarks vermittelt die starke Wechselwirkung. Zu ihrer Beschreibung muss man eine spezielle Theorie, die Quantenchromodynamik, verwenden – eine komplexe Aufgabe. Unser bisheriges Wissen über das quantenmechanische Verhalten von Kernbausteinen stammt aus der Kernphysik und deren Experimenten zum Aufbau der irdischen Atomkerne. Beschleuniger, in denen die Physiker schwere Ionen aufeinander schießen, liefern uns Informationen über die Kompressibilität der Kernbausteine. Dennoch kann man nicht einfach aus den Eigenschaften der irdischen Atomkerne auf diejenigen der Neutronensternmaterie schließen.

Irdische Atomkerne enthalten ungefähr gleich viel Neutronen wie Protonen, sind positiv geladen, heiß im Vergleich zur Fermi-Energie und enthalten keine *strange*-Quarks. Gänzlich andere Verhältnisse hingegen können in einem Neutronenstern vorliegen: hohe Dichte von *strange*-Quarks, eine im Vergleich zur Fermi-Energie geringe Temperatur, ein neutraler Zustand (weil Elektronen und Myonen Teil der Flüssigkeit sind und die Ladung der Protonen ausgleichen) und weitaus mehr Neutronen als Protonen.

Zudem bindet in Atomkernen die starke Wechselwirkung die Protonen und Neutronen aneinander, während in Neutronensternen die Gravitation für den Zusammenhalt sorgt. Neutronensterne sind also nicht einfach »große Atomkerne« – zumal bei ihren hohen Dichten auch neue Teilchen auftreten wie Myonen und Hyperonen. Diese Teilchen können die Physiker in ihren Beschleunigerexperimenten nur im isolierten Zustand untersuchen – in Neutronensternen verhalten sie sich gewiss anders. Aus all diesen Gründen kennen wir die Zustandsgleichung der Materie in Neutronensternen nicht.

Die verschiedenen Modelle, welche die Theoretiker vorgeschlagen haben, lassen sich nach der »Härte« ihrer Zustandsgleichung unterscheiden. Eine Zustandsgleichung ist umso härter, je schneller der Druck mit der Dichte ansteigt. Je härter sie ist, desto größer ist die maximale Masse, oberhalb derer der beschriebene Stern nicht mehr existieren kann. Ein Modell, das ein Mesonenkondensat im Kern zulässt, läuft auf eine sehr weiche Zustandsgleichung hinaus, da diese als Bosonen nur einen geringen Anteil am Druck haben, und verbietet das Vorhandensein von sehr massereichen Neutronensternen. Würde man nun einen Neutronenstern finden, dessen Masse über dem durch dieses Modell vorgegebenen Grenzwert liegt, so müsste man die zu Grunde gelegte Zustandsgleichung als falsch erachten und den Schluss ziehen, dass es in Neutronensternen kein Mesonenkondensat gibt.

Diese Überlegung zeigt, wie astronomische Beobachtungen einige der theoretischen Modelle aussortieren können. So ergibt sich beispielsweise aus der Hypothese, nach der Neutronensterne aus einem Fermigas bestehen (also Körper sind, deren Druck einzig von Fermionen hervorgerufen wird, die dem Pauli-Prinzip unterworfen sind), eine maximale Masse von siebzig Prozent der Sonnenmasse. Nun sind aber zahlreiche Neutronenster-



Der Übergang von der inneren Kruste zum flüssigen Mantel vollzieht sich allmählich. Zunächst bilden sich in der festen Kruste kleine Bereiche aus Neutronenflüssigkeit, die sich mit zunehmender Tiefe zusammenlagern und schließlich die kristallinen Schichten zurückdrängen.

ne mit 1,4facher Sonnenmasse bekannt. Die Astronomen folgern daraus, dass in ihnen nicht der Druck von Fermionen, sondern die starke Wechselwirkung der hier maßgeblichen Teilchen der Gravitation entgegenwirkt.

Was Beobachtungen verraten

Im Wesentlichen geht es darum, aus den theoretischen Modellen Werte für beobachtbare Größen abzuleiten und diese dann mit den Beobachtungsbefunden zu vergleichen. Da ist zunächst die Masse von Neutronensternen, die man dann recht einfach ermitteln kann, wenn sich der Neutronenstern in einem Doppelsystem befindet. Bisher widerspricht keines der Ergebnisse den klassischen Zustandsgleichungen. Mit dem europäischen Röntgensatelliten XMM-Newton ist es einem Forscherteam um Jean Cottam vom Goddard-Raumflugzentrum der Nasa in Greenbelt gelungen, das Verhältnis von Masse zu Radius – die so genannte Kompaktheit – des Neutronensterns EXO 0748–676 zu ermitteln. Dieses liegt – in Einheiten, bei denen die Gravitationskonstante und die Lichtgeschwindigkeit eins beträgt – bei fast 0,25. Im Vergleich zur Erde (10^{-10}) oder zur Sonne (10^{-6}) ist dies ein riesiger Wert, aber nur wenig kleiner als der Wert für Schwarze Löcher (0,5). Dieses Ergebnis stimmt mit den gewöhnlichen Modellen sehr gut überein.

Die Oberflächentemperatur von Neutronensternen leiten die Astronomen aus dem Spektrum im Röntgenbereich ab. Kürzlich hat eine Arbeitsgruppe um Stephen S. Murray vom Harvard Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge mit dem Röntgensatelliten Chandra die Temperatur eines der jüngsten Neutronensterne im Milchstraßensystem gemessen: des zentralen Pulsars im Nebel 3C 58, der als Relikt der im Jahr 1181 aufgeleuchteten Supernova gilt. Angesichts des geringen Alters des Sterns erscheint seine Temperatur sehr niedrig. Einige Astronomen vermuten, es könne sich um einen Seltsamen Stern handeln. Womöglich sind aber die Neutronen in 3C 58 superfluid und kühlen sich deshalb schneller ab. Ein solcher Prozess wird im bisherigen Modell nicht berücksichtigt. Den Radius eines Neutronensterns zu messen ist sehr schwierig, aber man kann ihn indirekt bestimmen, sei es über die Temperatur, die Leuchtkraft und die Entfernung des Sterns oder aber über seine Kompaktheit und Masse.

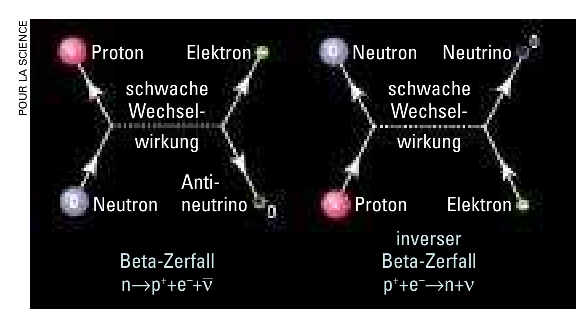
Inzwischen haben andere Beobachtungen gezeigt, wie unerwartet komplex ein Neutronenstern ist. Manche scheinen gelegentlich einen »Kick« zu bekommen: Die Frequenz ihrer Radiosignale erhöht sich unvermittelt und kehrt erst im Laufe von Tagen zu ihrem vorherigen Wert zurück. Dieses Phänomen wurde bei vier Pulsaren bereits mehrfach beobachtet. Die deutliche Diskontinuität des Signals lässt vermuten, dass die Ursache des Phänomens in der festen Kruste zu suchen ist. Es könnte eine Art Sternbeben sein, eine tektonische Verschiebung, die von den superfluiden Neutronen in den inneren Schichten angetrieben wird.

Das Superfluid dreht sich nicht wie eine gewöhnliche Flüssigkeit mit dem Rest des Sterns mit, sondern fließt reibungslos. Es tritt sogar noch ein weiteres außergewöhnliches Quantenphänomen auf, das man von Experimenten mit superflüssigem Helium im Labor kennt: Anstatt als Ganzes zu rotieren, bilden sich im Flüssigkeitsvolumen Wirbel aus. Entlang dieser »Vortices« genannten Röhren ist Rotation möglich. Vortices stoßen dort an die feste Kruste, wo Neutronen die Atomkerne verlassen. Das erklärt letztlich auch den »Kick«. Denn das Innere von Neutronensternen besteht aus zwei Flüssigkeiten: einer normalen aus Protonen und Elektronen sowie einer superflüssigen aus Neutronen.

Wegen des Energieverlusts durch Abstrahlung in der Nähe der Oberfläche verlangsamt sich der Stern, aber diese Abbremsung betrifft zunächst nur die Schale und den normal flüssigen Teil. Das Superfluid rotiert ungebremst weiter. Dadurch verbiegen sich die an der Kruste verankerten Vortices und ziehen so fest an ihr, bis sie irgendwann reißt.

Die Astronomen hoffen, durch neue Beobachtungstechniken bald zu weiteren spektakulären Erkenntnissen zu kommen. Insbesondere die Entdeckung der bislang nur hypothetischen Gravitationswellen könnte das Wissen um die Vorgänge in Neutronensternen erweitern.

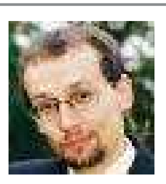
Ob es tatsächlich Seltsame Sterne gibt, die aus freien Quarks zusammengesetzt sind, kann ebenfalls nur durch Beobachtungen geklärt werden. Da Seltsame Sterne nicht durch Gravitation, sondern durch starke Wechselwirkung zusammengehalten würden, sollten sie sich von Neutronensternen unterscheiden, wie ein Gedankenexperiment zeigt: Schaltete man in einem Neutronenstern die Gravitation ab, so würde er wegen seines Innendrucks explodieren. Ein Seltsamer Stern hingegen würde sich kaum bewegen.



Beim Beta-Zerfall zerfällt ein Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino, während sich beim inversen Prozess ein Proton und ein Elektron in ein Neutron und ein Neutrino umwandeln.

Seltsame Sterne sollten kleiner sein und rascher rotieren als Neutronensterne. Die Beobachtung eines Pulsars mit einer Periode von weniger als einer halben Millisekunde wäre bereits ein Hinweis auf derartige Himmelskörper. Zwei vom Satelliten Chandra beobachtete Objekte haben im April 2002 Aufsehen erregt: Der bereits erwähnte Pulsar im Nebel 3C 58, dessen Abkühlungsprozess zu schnell erscheint, und RXJ 18565–3754, aus dessen gemessener Leuchtkraft und Temperatur man seine Entfernung zur Erde und seinen Radius ermitteln konnte. Mit Durchmessern um elf Kilometer sind beide eigentlich zu klein für einen Neutronenstern. Sind sie also Seltsame Sterne? Noch lässt die Genauigkeit der Beobachtungen, aber auch diejenige der Theorie zu viele Fragen offen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Jérôme Novak forscht am Laboratoire de l'Univers et de ses Théories in Meudon, das gemeinsam vom Centre National de la Recherche Scientifique, der Sternwarte Paris-Meudon und der Universität Paris 7 betrieben wird.

Physics of neutron star interiors. Von David Blaschke, Norman K. Glendenning und Armen Sedrakian (Hg.). Springer, 2001

Compact stars. Nuclear physics, particle physics and general relativity. Von Norman K. Glendenning. 2. Aufl., Springer, 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Weißes Gold aus der Alchemistenküche

Aus unscheinbaren Pulvern wird Gebrauchsgut oder fast durchscheinende Designerware.

Von Bernhard Gerl

Ob Kaffeetasse oder Suppenschüssel – Porzellan fehlt in keinem Haushalt. Wie jede Keramik (nach griech. *kéramos*, »Töpferton«) besteht es aus gebrannten tonmineralhaltigen Rohstoffen, ist hitzebeständig, hart und wasserdicht. Weil Porzellan nicht mit anderen Stoffen chemisch reagiert und demzufolge auch keinen Geschmack annehmen kann, eignet es sich besonders gut zum Garen und Servieren von Nahrungsmitteln. Hinzu kommt eine ansprechende Optik. Dünnwandige Teile erscheinen sogar leicht transparent wie Glas – tatsächlich ist dieses Material ein erstarrtes Gemisch aus einer kristallinen und einer glasförmigen Phase.

Als Rohstoffe dienen Feldspat, Quarz und Porzellanerde (Kaolin) im Verhältnis 1 : 1 : 2. Hauptbestandteil des Kaolins ist Kaolinit (chemische Formel $Al_2(OH)_4[Si_2O_5]$), hinzu kommen Tonerde (Al_2O_3), Kieselsäure (SiO_2) und Wasser. Die genaue Zusammensetzung hängt davon ab, bei welchen Temperaturen der Körper später gebrannt werden soll.

Diese Rohstoffe werden vom Zulieferer aufbereitet und zu Pulver gemahlen, beim Porzellanhersteller vermischt und dann durch Pressen, Drehen oder Gießen in Form gebracht (siehe Grafiken unten). Nach einem Vortrocknen erfolgt der erste Brand bei zirka 1000 Grad Celsius (Glühbrand). Dabei verflüchtigt sich alles Wasser und ein fester, aber durchaus noch poröser Rohling entsteht. Porzellan entsteht daraus erst beim nächsten Brand, bei dem auch die Glasur aufgeschmolzen wird. Die Rohstoffe dafür sind im Wesentlichen die schon genannten; die Pulver werden in Wasser fein verteilt. Für einige Sekunden in diese Dispersion eingetaucht, saugen die Poren des Rohlings durch Kapillarwirkung Flüssigkeit auf, die Pulverteilchen werden dabei mitgezogen und bilden eine dünne Schicht.

Jetzt folgt der so genannte Glattbrand, und zwar je nach Porzellanart bei 1300 bis 1440 Grad: So genanntes Weichporzellan wie das Vitreous China und das Bone China entsteht bei der geringeren Temperatur, Hartporzellan bei der höheren. Ersteres ist meist cremeweiß bis gelb und kommt im Haushalt zum Einsatz, das rein weiße Hartporzellan hält den Belastungen in Gastronomie, Krankenhäusern und Altersheimen besser stand.

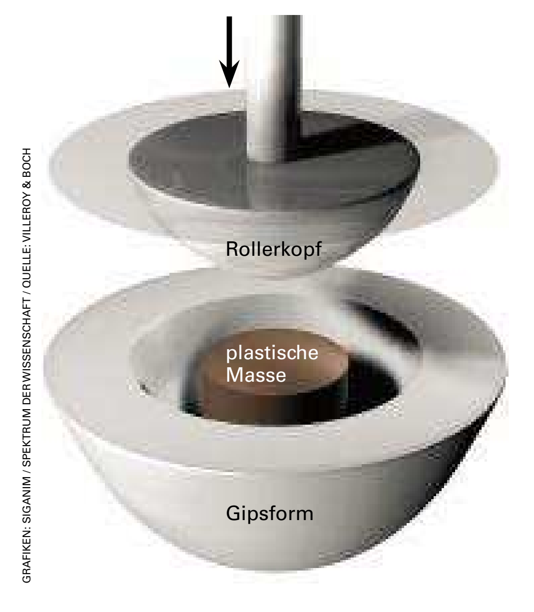
Beim Glattbrand schmilzt Feldspat zuerst, sowohl im geformten Körper als auch in der Glasur. In seiner Schmelze löst sich dann der größte Teil des Quarzes. Das Kaolinit sorgt dafür, dass der Körper formstabil bleibt. Außerdem bilden sich winzige, Mullit genannte Kristalle aus Tonerde und Kieselsäure. Das Ergebnis nach dem Abkühlen ist ein Körper aus siebzig Prozent Glas, in den kleinste Kristalle aus Quarz (fünf Prozent) und Mullit (25 Prozent) mit Durchmessern von 0,5 bis zehn Mikrometern eingebettet sind. Die äußere durchsichtige Glasurschicht ist etwa ein viertel Millimeter dick.

Der Körper schrumpft beim Glattbrand um bis zu 14 Prozent. Dies macht die Konstruktion von Porzellanteilen sehr schwierig, vor allem dann, wenn zwei Teile, die ineinander passen müssen, getrennt hergestellt werden, wie eine Kanne mit Deckel.

Nur selten erfolgt der Farbauftrag noch vor dem Glasurbrand. Denn für Temperaturen um 1400 Grad gibt es nur Schwarz, Blau und Grün als Farbe. Heute wird das Dekor automatisch oder per Hand als Abziehbild aus einem Trägermaterial und keramischen Farben aufgetragen und dann ein drittes Mal gebrannt. Wird bis 900 Grad Celsius aufgeheizt, schmelzen die Farben auf der Glasur und bleiben dort haften – so werden zum Beispiel Goldränder aufgebracht –, bei 1280 Grad dringen sie ein und sind so gegen Beschädigung geschützt. ◁

Bernhard Gerl ist Physiker und Fachautor in Regensburg.

Einformen

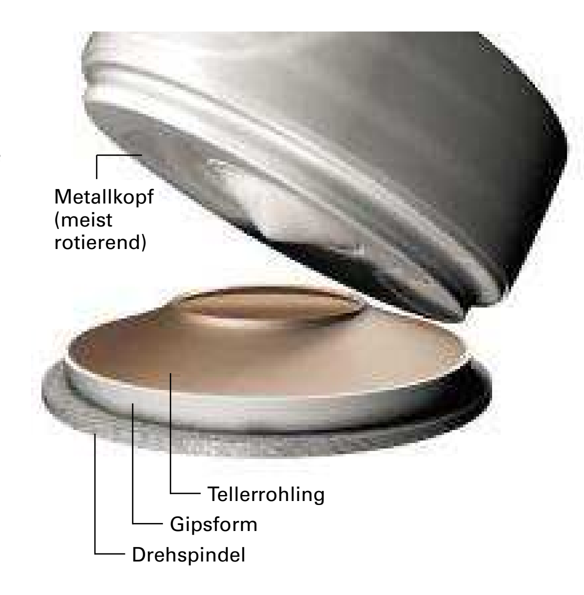


GRAFIKEN: SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / QUELLE: VILLEROY & BOCH

◀ **Um hohle, aber nicht geschlossene Produkte wie Schüsseln oder Tassen zu fertigen, presst man Paste durch rotierende Rollerköpfe in das Relief einer Gipsform.**

▶ **Zur Formung eines Tellers wird eine fingerdicke Scheibe vom Massestrang geschnitten, auf eine flache Gipsform gelegt und dann in Rotation versetzt. Ein meist ebenfalls rotierender Metallkopf formt die Gegenseite des Geschirrs.**

Überformen



Kernguss

Saucieren-
rohling

Innenseite

Außenseite

Hohlguss

aufgeklappte Gipsmaske

durch flüssigen Schlicker gegossene Kanne

Kannen, Suppenschüsseln und andere hohle, oft aber nicht runde Produkte werden gegossen. Die Form besteht aus porösem Gips, der dem flüssigen Schlicker Wasser entzieht. Beim Hohlguss entsteht dadurch eine lederartige Schicht an der inneren Wandung der Form. Je später der restliche Schlicker ausgegossen wird, umso dicker wird das Porzellan. Beim Kernguss werden Außen- wie Innenseite geformt.

WUSSTEN SIE SCHON?

Steingut ist kein Porzellan, denn es wird beim ersten Brand auf 1100 bis 1300 Grad Celsius erhitzt, dadurch bilden sich durch das austretende Wasser Bläschen im Kristallgefüge. Es bleibt darum porös, und die Glasur, die danach bei 900 bis 1200 Grad aufgeschmolzen wird, kann deshalb leichter absplittern.

Die **Belastbarkeit** wird durch die Glasurhärte und die Kantenschlagfestigkeit angegeben. Die Härte wird meist nach der Skala des deutschen Mineralogen Friedrich Mohs (1773–1839) gemessen, der zehn Minerale so angeordnet hatte, dass das mit den höheren Werten das mit der niedrigeren Härte ritzen kann. Talk hat Härte 1, Diamant Härte 10. Hartporzellan mit 6–7 übertrifft Stahl (5–6), sodass Messer und Gabeln keine Kratzer im Teller hinterlassen. Die Kantenschlagfestigkeit ist vor allem für das stark beanspruchte gewerblich genutzte Porzellan von Bedeutung.

Porzellan lässt sich grundsätzlich färben, zumindest dann, wenn die Temperaturen des Glattbrands nicht mehr als 1300 Grad Celsius betragen. Dann zerfallen die Farbstoffe, oxidieren oder werden reduziert. Und wenn es doch glückt, sind die Farben nicht reproduzierbar. Einem deutschen Hersteller für Hotelporzellan, BHS-tabletop, gelang es im vergangenen Jahr erstmals, cremefarbenes **Hartporzellan** herzustellen – damit ähnelt es dem als edel empfundenen **Chinaporzellan**. Ein besonderer keramischer Farbstoff und die Steuerung der Prozessparameter beim Glattbrand waren dabei entscheidend.

Scherben ist der Töpferausdruck für jedes gebrannte Töpfergut. Das alte Sprichwort »Scherben bringen Glück« meinte also »Gefüllte Vorratsgefäße aus Ton bringen Glück«.

Vermutlich wurde **das erste Porzellan** vor fast 1500 Jahren in China hergestellt. Der nebenstehende Krug in Doppelkürbisform stammt aus der nördlichen Sung-Dynastie (11. Jahrhundert). Im 13. Jahrhundert gelangte chinesisches Porzellan vereinzelt an europäische Fürstenhöfe und wurde dort mit Gold aufgewogen. Zwischen 1600 und 1730 entwickelte das Reich der Mitte daraus einen einträglichen Exportzweig, doch 1709 erfand der Alchemist Johann Friedrich Böttger (1682–1719) Porzellan zum zweiten Mal (als Zufallsprodukt beim Versuch der Goldherstellung). Sein Auftraggeber, König August der Starke, gründete daraufhin 1710 in Meißen die erste Porzellanmanufaktur Europas.



AKG-IMAGES / ERICH LESSING

Medikamente direkt zum Ziel

Ideale Medikamente sollten ihr Ziel im Körper ohne Wirkungsverlust sowie in genauer Dosierung und Zeitabstimmung erreichen. Die Technologien dafür sind weit fortgeschritten.

Von Robert Langer

Wer eine Arznei schluckt, schickt sie auf einen langen, hürdenreichen Weg, bevor der Wirkstoff endlich zum Ziel gelangt. Das Medikament soll unter anderem den Magensäften und den Verdauungsenzymen des Darmes standhalten. Auch müssen die Dünndarmzellen es unversehrt ins Blut schleusen, und als Nächstes muss es die Filter der Leber passieren. Erst dann kann es sich über den Blutkreislauf im Körper verteilen.

Viele moderne Medikamente überwinden diese Hürden tatsächlich schon unbeschadet, dank einfallsreicher Lösungen, welche die Pharmaindustrie fand – auch wenn sich leider nicht alle Substanzen dazu eignen. Zu den bewährten Strategien gehört zum Beispiel, den Wirkstoff in einer Kapsel zu verpacken, die dem sauren Magenmilieu widersteht. Sie löst sich erst im Dünndarm – dessen Milieu eher alkalisch ist – auf, sodass die Wirkstoffmoleküle dort freikommen und im Prinzip vom Körper aufgenommen werden könnten.



Nun handelt es sich allerdings bei vielen modernen Medikamenten – vor allem bei den meisten biotechnologisch erzeugten Arzneien – um Proteine. Diese sehr großen Moleküle müsste man zusätzlich im Darm vor dem Zugriff der proteinabbauenden Enzyme – der Proteasen – schützen. Dieses Ziel ließe sich erreichen, wenn das Medikament als Leibwächter so genannte Protease-Inhibitoren mitbrächte. Wie aber sollen Proteine, die ja viel größere Moleküle darstellen als herkömmliche Wirkstoffe, überhaupt die Darmwand durchqueren? Normalerweise absorbieren die Darmzellen nur relativ kleine Moleküle. Proteine nehmen sie gewöhnlich zerlegt auf.

Die Medikamentengabe über den Darm bietet noch mehr Schwierigkeiten, welche nicht nur für Proteine gelten. Trotz aller Tricks machen es Pillen und andere geschluckte Arzneien den Pharmakologen schwer zu steuern, wie rasch und in welchen Mengen ein Medikament in die Blutbahn gelangt und wie lange es in den Geweben und Zielorganen wirksam bleibt. Die Pharmakokinetik lässt sich selbst mit speziellen Überzügen und Beigaben von Pillen nur begrenzt beeinflussen. Dies möglichst genau zu kontrollieren ist aber oft be-

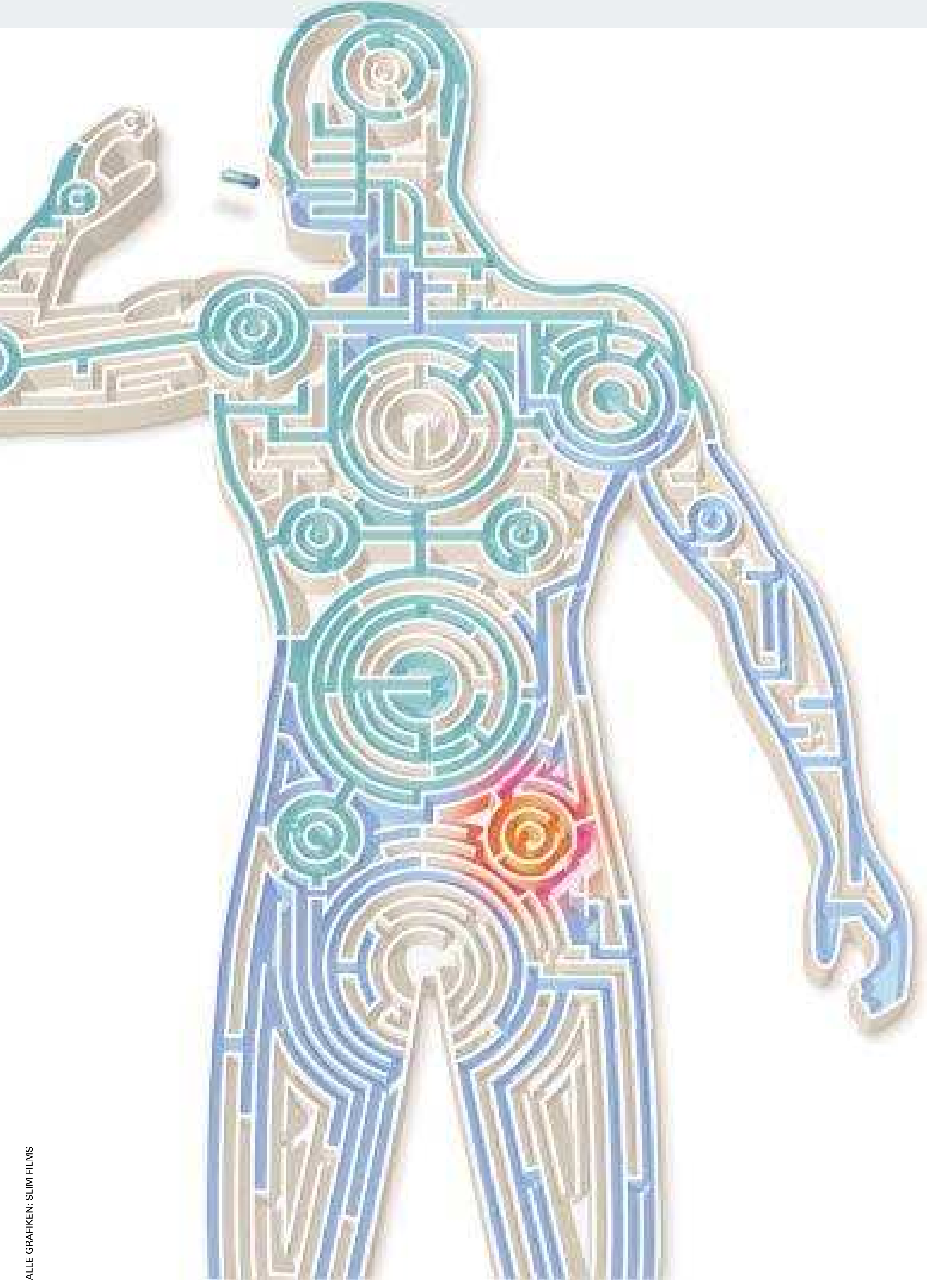
deutsam. Für den Patienten kann es lebensgefährlich sein, wenn ein Stoff zu rasch in hoher Konzentration in die Blutbahn dringt oder wenn er zu lange im Körper verweilt. Umgekehrt kann es auch gefährlich werden, wenn das Medikament seine Wirksamkeit zu früh verliert, etwa weil der Eintritt in den Blutkreislauf zu langsam geschieht.

Sicher ließen sich viele dieser Hürden umgehen, würde man das Medikament spritzen. Doch wer geht dafür gern täglich zum Arzt oder setzt sich selbst mehrmals am Tag eine Spritze? Deswegen haben Wissenschaftler in den letzten zwanzig Jahren eine Reihe alternativer Darreichungsformen entwickelt: Hautpflaster, Implantate, Injektionen von Depots, auch Hautgels und Nasen- oder Lungensprays. Der Markt hierfür übersteigt allein in den USA schon 20 Milliarden Dollar im Jahr.

Suche nach der besten Pforte

Beispiele aus jüngster Zeit sind zwei Medikamente, die seit kurzem auf dem Markt sind. Das eine heißt Nutropin Depot. Es enthält biologisch abbaubare Polymerkügelchen, die injiziert werden und bis zu vier Wochen lang menschliches Wachstumshormon liefern. Eine Spritze ist deshalb nur alle paar Wochen nötig. Das andere Medikament heißt Gliadel. Es handelt sich um eine winzige Scheibe mit Chemotherapeutika zur Behandlung von Hirntumoren, die als Depot direkt an den Ort des entfernten Tumors implantiert wird. Ein weiteres Beispiel sind mit Polymeren überzogene so genannte Stents für Blutgefäße, die Wirkstoffe freisetzen. Sie helfen die Blutgefäße offen zu halten, wenn durch Gerinnsel verengte Gefäße erweitert werden mussten.

Ob Haut, Nase, Lunge oder Darm – Forscher untersuchen inzwischen so gut wie jeden Körperbereich daraufhin, ob er Eintrittspforte für Medikamente sein könnte. Unter anderem entstehen dabei nichtinvasive Verfahren, um sogar kompliziert gebaute Moleküle einzuschleusen. Zum Beispiel gelingt es mittels Ultraschall, solche Stoffe schmerzlos durch die Haut zu befördern. Implantierbare Mikrochips wiederum, die Wirkstoffe präzise und nach einem festen Zeitplan freigeben, beruhen auf der Kombination von neuester Nanotechnologie und Mikrosystemtechnik. ▷



ALLE GRAFIKEN: SLIM FILMS

IN KÜRZE

▶ Viele Medikamente eignen sich nicht zum Einnehmen als **Pillen** oder **Tropfen**, weil sie im Magen-Darm-Trakt vorzeitig abgebaut würden. Das gilt besonders auch für biotechnologisch hergestellte **Wirkstoffe auf Proteinbasis**.

▶ Die Pharmaforschung arbeitet an neuen Wegen, Medikamente zu verabreichen. Zu den neuen Entwicklungen gehören unter anderem **am Körper tragbare Systeme**, die Substanzen mittels Stromstoß oder Ultraschall schmerzfrei durch die Haut befördern.

▶ Die Zukunft verheißt **mit Wirkstoffen beladene intelligente Mikrochips**, die unter der Haut oder an Ort und Stelle implantiert werden. Sie sollen Medikamente in vorprogrammierter Dosierung verabreichen und können mit Computern in einer Arztpraxis kommunizieren.

Durch die Darmwand

Schwierigkeiten:

▶ Abbau von Wirkstoffen schon im Magen oder Darm durch Verdauungssäuren und Verdauungsenzyme

▶ Durchqueren der Darmwand für viele Wirkstoffe ohne besondere Hilfen schwierig bis unmöglich

Lösungsansätze (siehe Bilder):

▶ Ein Überzug aus speziellen, bioadhäsiven Polymeren, die sich an die Darminnenwand binden oder sich zwischen den Darmzellen hindurchquetschen können (a)

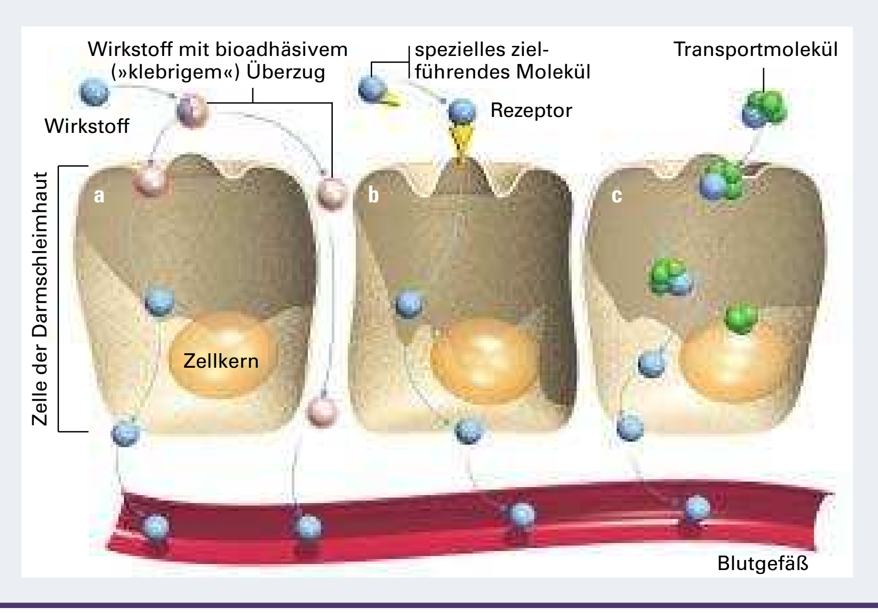
▶ Anbinden des Wirkstoffs an ein zielführendes Molekül, das an Rezeptoren auf Darmzellen andockt und dann von den Zellen aufgenommen wird (b)

▶ Ankoppeln des Wirkstoffs an spezielle Transportmoleküle, welche das Medikament in die Darmzellen einschleusen (c)

einige Firmen, die dazu forschen:

▶ GroPep, Adelaide (früher Biotech Australia, Roseville, New South Wales)

▶ Emisphere Technologies, Tarrytown (New York)



▷ Betrachten wir zunächst die modernen Möglichkeiten für Arzneien, die der Patient schluckt. Mit dem Problem, große Moleküle über den Darm in den Körper zu bringen, befassen sich etliche Forscherteams. Die Gruppe um Edith Mathiowitz von der Brown University in Providence (Rhode Island) verpackt Proteine in winzig kleine Bläschen aus einer klebrigen Substanz. Dank dieses »Bioadhäsivums« können sich die Bläschen durch die Darmzellen beziehungsweise zwischen ihnen hindurchzwängen (siehe Bild oben).

Die Idee, die Bioadhäsion zu nutzen, damit sich Wirkstoffe an Schleimhäuten anlagern, geht auf Forschungen der 1970er und 1980er Jahre zurück. Zu den Pionieren des Konzepts gehörten die Teams um Tsuneji Nagai von der Hoshi-Universität Tokio, Joseph R. Robinson von der Universität von Wisconsin in Madison und Nicholas A. Peppas von der Purdue-Universität in West Lafayette (Indiana). Peppas arbeitet heute an der Universität von Texas in Austin.

Bis vor zehn Jahren galten hydrophile, also Wasser liebende Polymere und Hydrogele als besonders viel versprechend. Je mehr Wasser die Verbindung anzulagern vermochte, das heißt je dichter sie mit Karboxylgruppen gespickt war, als desto geeigneter galt sie für den Medikamententransport. In der Tat treten solche Verbindungen sehr gut mit der Darmschleimhaut in Kontakt. Dann zeigte sich aber, dass sie nur schlecht durch die Darmwand dringen. Auch geben solche Substanzen das anhaftende Protein zu schnell frei.

Wie Edith Mathiowitz 1997 entdeckte, eignen sich Polyanhydride besser: Wasser abstoßende – hydrophobe – bioadhäsive Polymere, die erst beim Zerfall freie Karboxylgruppen auf ihrer Oberfläche aufweisen. An die Darmschleimhaut binden sie sich ebenso gut wie hydrophile Polymere. Sie durchqueren die Schleimhaut aber viel besser und gelangen darum rascher in die Blutbahn. Besonders ein Polyanhydrid der Fumarsäure und Sebacinsäure sticht mit diesen Eigenschaften hervor. Geprüft wird derzeit, ob sich die Technologie zur Entwicklung einer Insulinform eignet, die der Diabetiker schlucken kann.

Neuentwicklungen für Diabetiker

Dass sich viele der Entwicklungen neuer Darreichungsformen von Medikamenten gerade auf Insulin konzentrieren, ist kein Zufall. Denn dieses lebenswichtige Protein benötigen Patienten mit Typ-1-Diabetes mehrmals täglich. Auch bei fortgeschrittenem Typ-2-Diabetes, dem so genannten Alterszucker, an dem aber zunehmend auch viele junge Menschen leiden, ist regelmäßiges Spritzen von Insulin unabdinglich. Tierversuche mit dem Polyanhydrid lieferten bislang sowohl bei hydrophilen als auch bei hydrophoben Proteinen viel versprechende Ergebnisse.

Peppas und Mitarbeiter haben Polymere entwickelt, die außerdem anschwellen, wenn sich in der Umgebung der pH-Wert erniedrigt. Dadurch schützen sie beispielsweise das anhaftende Protein – etwa Insulin – vor den sauren Magensäften, geben es aber im eher alkalischen Milieu des Darms frei. Mit Polymeren lassen sich verabreichte Proteine auch gegen die Proteasen im oberen Abschnitt des Dünndarms abschirmen. Die Hilfsstoffe vermögen sogar vorübergehend die Zellen des Dünndarms zu lockern, sodass das Protein passieren kann.

Bei einem anderen Verfahren umschließen spezielle Transportmoleküle die Proteine und schleppen sie durch die Darmbarriere. Eine ganze Serie solcher molekularen Transporteure (Carrier) hat die Firma Emisphere Technologies in Tarrytown (US-Bundesstaat New York) entwickelt. Anscheinend quetschen diese Helfer ihre Fracht förmlich zusammen, wodurch die Proteine vorübergehend kleiner werden und Zellmembranen somit leichter passieren. Hat der Carrier

den Wirkstoff in eine Zelle des Darms geschleppt, fällt er ab, und das Protein kehrt in seine native, aktive Form zurück (siehe Bild links, c). Zurzeit testet Emisphere, ob sich das Verfahren für Insulin eignet sowie für den Gerinnungshemmer Heparin, den manche Patienten zur Blutverdünnung wegen Thrombosegefahr benötigen.

Andere Forscher versuchen, das gewünschte Protein mit einem zweiten Molekül zu koppeln, welches spezifische Rezeptoren auf Zellen im Magen-Darm-Trakt erkennt (siehe Bild links, b). Bei einer der ersten solcher Kombinationen nutzte Gregory J. Russell-Jones von der früheren Firma Biotech Australia in Roseville (New South Wales), jetzt GroPep, Adelaide, das Vitamin B_{12}.

Für dieses Vitamin verfügen die Darmzellen über spezielle Rezeptoren, die es schnappen und durch die Darmwand hieven. Indem Russell-Jones ein Protein an Vitamin B_{12} koppelte, konnte er den Rezeptor überlisten, zusammen mit dem Vitamin auch das Protein weiterzubefördern. Nur ist leider die Anzahl der Vitamin-B_{12}-Rezeptoren im Darm nicht besonders groß. Für manche medizinischen Zwecke würde sie nicht ausreichen. Als Alternative erproben Forscher jetzt unter anderem Lektine. Diese ebenfalls klebrigen Moleküle, die zwischen den Schleimhautzellen sitzen und für deren Zusammenhalt sorgen, sind im Darm reichlich vorhanden.

Die Hautbarriere schmerzlos überwinden

Mehr noch als der Darm bietet sich die Haut an, um Medikamente direkt ins Blut einzuschleusen. Für viele Stoffe ist sie normalerweise nur schwer zu überwinden, doch manche Substanzen eignen sich auf Grund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften hervorragend dazu, auf diesem Wege in ausreichendem Maße in den Körper zu gelangen. Auf dem Markt sind schon mit Medikamenten versehene transdermale Pflaster, die mehrere Tage auf der Haut bleiben: zum Beispiel Nikotinpflaster für Raucher, um den Entzug zu erleichtern, oder für Frauen nach den Wechseljahren Östrogenpflaster. Hormonpflaster eignen sich auch als ein Bestandteil einer Empfängnisverhütungsmethode.

Für viele Wirkstoffe, die nicht einfach durch die Haut wandern, gibt es andere für den Patienten einfache Verfahren. Sie eignen sich auch für Proteine. Eine Möglichkeit ist, die an sich dichte Oberhaut mittels sehr schwacher, nicht schmerzhafter elektrischer Impulse durchgängig zu machen. Diese Iontophorese genannte Technik erproben zwei amerikanische Firmen bereits an Patienten: die Firma ALZA in Mountain View (Kalifornien) sowie unabhängig davon Vyteris, ein Ableger von Becton Dickinson in Fair Lawn (US-Bundesstaat New York).

Üblicherweise verwendet man zwei Elektrodenpflaster, ein negativ und ein positiv geladenes. Die Pflaster sind an ein kleines Medikamentenreservoir angeschlossen (siehe Kasten unten). Ein ganz leichter Stromstoß befördert den Wirkstoff durch die obere Hautschicht und in die Blutgefäße der Unterhaut.

Es gibt schon eine Reihe von Anwendungen. Vyteris beispielsweise hat ein Verfahren für das örtliche Betäubungsmittel Lidocain entwickelt. Bei seinem System ist die Batterie so klein, dass sie sich unter der Kleidung tragen lässt. Die Firma plant auch klinische Tests an Osteoporosepatienten mit dem Parathormon der Nebenschilddrüse, das den Kalziumhaushalt regulieren hilft. Sie will prüfen, ob das System die erforderliche tägliche Dosierung leistet.

Vyteris untersucht des Weiteren, ob man mit dem Verfahren Frauen, die sich einer künstlichen Befruchtung unterziehen wollen, das zur Stimulierung der Eierstöcke alle neunzig Minuten erforderliche Gonadotropin-Releasing-Hormon (GRH) verabreichen kann.

Auch Ultraschall vermag die Hautdurchlässigkeit zu erhöhen. Er lockert vorübergehend die verhornte äußere Schicht, die Hauptbarriere für eindringende Stoffe. Das entdeckte Joseph Kost von der Ben-Gurion-Universität in Be'ersheva (Israel), der auch als Gastforscher in meinem Labor gearbeitet hat. ▷

Durch die Haut

Schwierigkeiten:

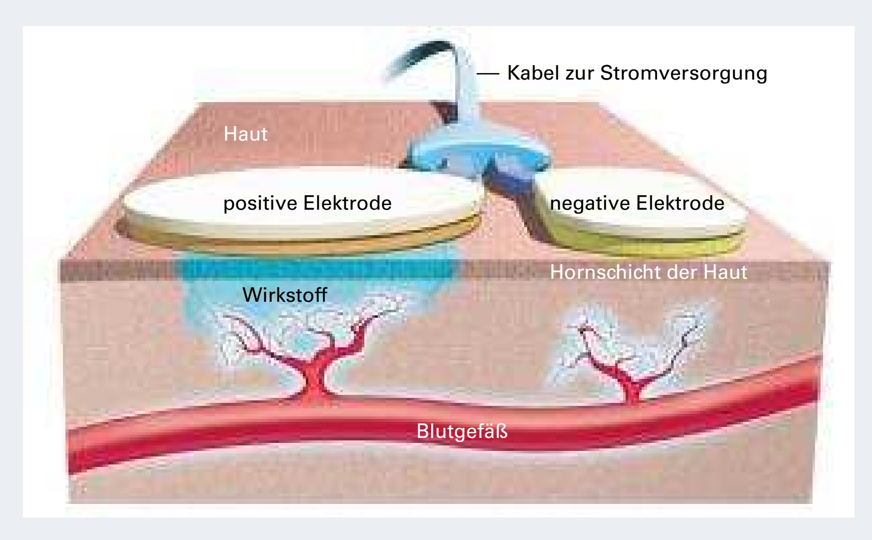
- die äußere Hautschicht aus verhornten Zellen verhindert bei vielen Wirkstoffen den Eintritt
- große Moleküle können kaum durch die Haut bis zu den Blutgefäßen dringen

Lösungsansätze:

- Iontophorese: kleine schmerzlose Stromimpulse machen die Haut durchlässig (siehe Bild)
- Ultraschall: Schallwellen öffnen vorübergehend in der oberen Hautschicht feine Kanälchen

Einige Firmen, die dazu forschen:

- ALZA, Mountain View (Kalifornien)
- Sontra Medical, früher Cambridge, jetzt Franklin (Massachusetts)
- Vyteris, Fair Lawn (New York)



Gentherapie

Wie schmuggelt man Gene ein?

Der Erfolg einer Gentherapie steht und fällt damit, wie gut das neue genetische Material in die Körperzellen und in den Zellkern gelangt. Um Gene einzuschleusen, kondensieren Forscher die entsprechende Erbsubstanz. Sie verpacken sie so, dass die Zellen diese Genpäckchen überhaupt aufnehmen können. In den Zellen müssen die fremden Gene vor zerstörerischen Enzymen geschützt sein. Das neue Genmaterial sollte bis in den Zellkern vordringen und dort in aktiver Form wieder freikommen.

Als Vektoren nutzen Wissenschaftler – neben einigen anderen Verfahren – seit Jahren oft Viren, die sie mit den gewünschten Genen befrachten. Diese können das Fremdmaterial wegen ihrer natürlichen Eigenschaften leicht mit einschmuggeln. Doch Viren bedeuten für den Patienten ein Risiko, obwohl sie vorher entschärft und ihrer Pathogenität beraubt werden. Das zeigten einige tragische Fälle der letzten Jahre.

Darum suchen die Forscher auch nach Alternativen. In Frage kommen als Verpackung unter anderem Polymere, große, regelmäßig aufgebaute Moleküle. Ein interessanter Ansatz setzt auf Zuckerverbindungen, die Mark E. Davis vom California Institute of Technology in Pasadena entwickelt hat: die kationischen (positiv geladenen) β-Cyclodextrine (abgekürzt CD).

Cyclodextrine sind wasserlöslich, relativ ungiftig und lösen keine Immunreaktion aus. Ursprünglich wollte Davis das Genmaterial einfach nur in nanometergroßen CD-Partikeln verpacken. Doch erwies sich diese Kombination im Tierversuch als zu instabil. Davis und Suzie Hwang Pun veränderten darum die Oberfläche der CD-Partikel mit einer weiteren Verbindung: Adamantan-konjugiertem Polyethylenglykol (PEG). So entstanden mit Genen beladene Nanopartikel einheitlicher Größe, die im Blutserum nicht mehr mit Proteinen zu nutzlosen Aggregaten verklumpen.

Weil Viren als Transportvehikel Risiken bergen, suchen Forscher nach Alternativen. Günstig erscheinen etwa Polymere, die das Erbmaterial einhüllen. Solche winzigen Pakete nehmen Zellen bereitwillig auf.



MARK E. DAVIS UND SUZIE HWANG PUN, CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY



J. L. CARSON, CUSTOM MEDICAL STOCK PHOTO

Die für eine Gentherapie vorgesehenen Gene werden oft in Plasmide, ringförmige DNA (rot), eingebaut. Dieser Ring benötigt eine geeignete Verpackung für den Transport.

PEG hat auch den Vorteil, dass man es als chemischen Haken verwenden kann, um weitere Verbindungen anzukoppeln. Das können zum Beispiel Moleküle sein, die zum gewünschten Ziel finden. Die von Davis gegründete Firma Insert Therapeutics in Pasadena (Kalifornien), wo Pun heute arbeitet, testet die Eignung für verschiedene Krebs- und Leberbehandlungen.

Ganze Sets (im Fachjargon Bibliotheken) von Polyaminoestern, biologisch abbaubaren kationischen Polymeren, stellte David M. Lynn von der Universität von Wisconsin in Madison her, der nach seiner Promotion in meinem Labor am MIT forschte. Beteiligt waren auch Daniel Anderson, ein anderer Wissenschaftler in meinem Labor, und David Putnam, der heute an der Cornell-Universität in Ithaca (New York) arbeitet. Es gelang ihnen, unter Hunderten von Verbindungen die vielversprechendsten herauszufischen, also jene, die sich leicht an die Erbsubstanz binden und sich auch sonst am günstigsten verhalten. Eine Reihe dieser Polymere bringt die Gene besser zum Ziel als die nichtviralen Standardvektoren Lipofectamin und Polyethylenimin.

Fred E. Cohen von der Universität von Kalifornien in San Francisco hat zusammen mit Ronald Zuckerman von der Firma Chiron in Emeryville (Kalifornien) eine neue Klasse von Polymeren synthetisiert: Peptoide (genauer: kationische N-substituierte Glycin-Oligomere). Manche davon können das Erbmaterial in nur fünfzig bis hundert Nanometer große Partikel verpacken – klein genug, damit Zellen sie aufnehmen.

Mit Lipiden (Fettverbindungen) forscht etwa Sung Wan Kim von der Universität von Utah in Salt Lake City. Das gewünschte Gen erhält eine Hülle aus Stearylpolylysin und darüber kommt noch ein Überzug aus Lipoproteinen. Bei Kaninchen gelang es, mit diesem Vektor ein Gen für den vaskulären endothelialen Wachstumsfaktor in infarktgeschädigte Herzmuskelzellen zu schleusen. Bald sollen Tests an menschlichen Patienten erweisen, ob sich das Verfahren eignet, um in defekten Herzregionen neue Blutgefäße wachsen zu lassen.

▷ Mittels Ultraschall erreichten mein Kollege Daniel Blankschtein vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge, mein Doktorand Samir Mitragotri und ich, dass Proteine von der Größe des Insulins bis zu 5000-mal besser über die Haut eindrangen.

Heute testet die früher von Kost geleitete, von mir mitgegründete Firma Sontra Medical in Franklin (Massachusetts) das Verfahren für Insulin und für Schmerzmittel. Dabei macht ein Energiestoß von 15 Sekunden die Haut an der Stelle für bis zu 24 Stunden durchlässiger. Die Energie ist erheblich niedriger als bei diagnostischen Ultraschallverfahren. Der Ultraschallkopf in dem Handgerät schwingt dabei mit einer Frequenz von 55 Kilohertz in einem flüssigen Medium, das Kontakt zur Haut hat. Unter der niederfrequenten Ultraschallschwingung entstehen winzige Bläschen, die sich im Kontaktmedium und in der Hornschicht ausdehnen und kontrahieren. Sie bohren regelrecht Tunnel für die Wirkstoffe.

Tief in die Lunge

Schwierigkeiten:

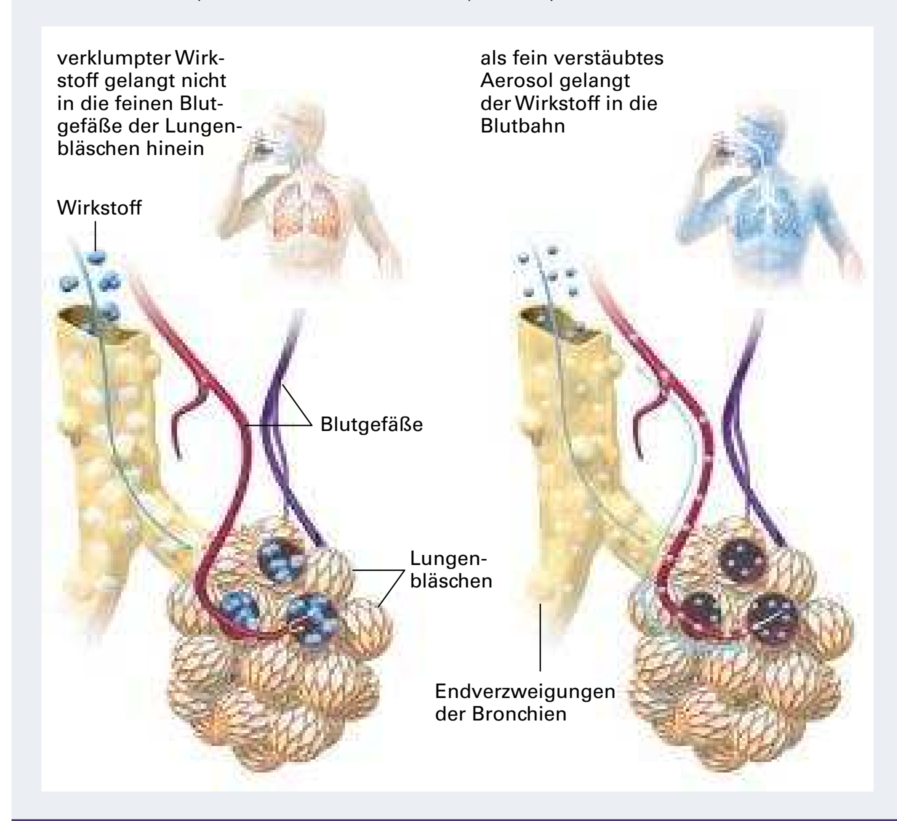
- Medikament muss bis zu den Lungenbläschen gelangen
- es muss der Zerstörung durch Immunzellen – Makrophagen – entgehen

Lösungen:

- Optimieren der Größe der Aerosolpartikel; sie müssen so klein sein, dass sie bis tief in die Lungenspitzen gelangen, dürfen zugleich aber nicht zusammenklumpen (Bilder)

Einige Firmen, die dazu forschen:

- Alkermes, Cambridge (Massachusetts)
- Aradigm, Hayward (Kalifornien)
- Nektar Therapeutics (früher Inhale Therapeutic Systems), San Carlos (Kalifornien)



Feinverstäubte Aerosole für die Atemwege

Auch die Lunge kann Eingangspforte sein. Das Einatmen von Medikamenten fordert wiederum eigene, anspruchsvolle Technologien. Diese Verabreichungsform bietet sich unter Umständen bei einer Lungenbehandlung an, kann aber auch angesagt sein, um einen Wirkstoff gegen andere Erkrankungen rasch in die Blutbahn zu schleusen. Die Lungenbläschen, in denen der Sauerstoff- und Kohlendioxidaustausch stattfindet, sind dicht von feinsten Blutgefäßen durchzogen. Prinzipiell können hier auf ähnliche Weise wie bei der Sauerstoffaufnahme auch größere Moleküle aus der Atemluft in die Blutbahn gelangen, beispielsweise Wirkstoffe auf Proteinbasis.

Allerdings war und ist es schwierig, geeignete und effiziente Inhalatoren zu entwickeln. Die Geräte müssen ausreichend – was zugleich erfordert: genügend kleine – Aerosolpartikel tief in die Lungen schleudern. Bei den meisten etwa gegen Asthma gebräuchlichen Vorrichtungen gelangen kaum zehn Prozent des Ausstoßes wirklich dorthin. Obendrein fangen Immunzellen in der Lunge, die Makrophagen, oft einen Großteil der Wirkstoffpartikel ziemlich rasch ab.

Etliche Wissenschaftler und Firmen tüfteln an besser geeigneten Inhalationsgeräten, die einen extrem fein verstäubten Aerosolnebel effizient genug spenden. Die Firma Aradigm in Hayward (Kalifornien) entwickelte eine Apparatur für Flüssigmedikamente. Dieser Inhalator treibt den Wirkstoff durch kleine Düsen, die sich vorab auf eine gewünschte Dosierung programmieren lassen. Ein Gerät der Firma Nektar Therapeutics (bis vor kurzem Inhale Therapeutics) in San Carlos (Kalifornien) erzeugt aus einem trockenen Pulver eine Aerosolwolke. Das Gerät presst Luft in das Pulver und zerkleinert dabei die Körnchen in feinste Partikel, die auch noch die tiefstgelegenen Lungenregionen erreichen. Derzeit erproben beide Firmen an Diabetikern, ob die Geräte Insulininjektionen ersetzen können.

Den Aerosolpartikeln selbst schenkten die Forscher bis Mitte der 1990er Jahre wenig Beachtung. David A. Edwards, der jetzt an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) arbeitet, suchte damals als Mitarbeiter in meinem Labor nach Aerosolstäuben mit günstigeren Eigenschaften. Seine Idee war, die Partikeldichte im Aerosol deutlich abzusenken und gleichzeitig die Größe sowie Porosität der einzelnen Partikel zu steigern. Dadurch würden, so überlegte er, die Teilchen weniger als bis- ▷

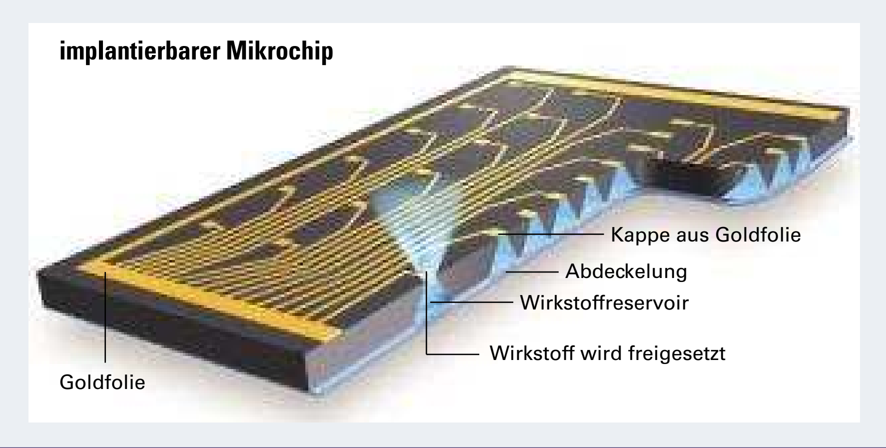
Kontrollierte Freigabe per Chip

Schwierigkeiten:
gleich bleibende Konzentration des Wirkstoffs, ohne ihn beständig von außen zuführen zu müssen

Lösung:
implantierte Mikrochips mit vielen Medikamentenreservoirs; bei Bedarf löst ein Stromstoß eine Goldfolie über einer oder mehreren der Reservoirs auf

Einige Firmen, die dazu forschen:
- ChipRx, Lexington (Kentucky)
- MicroCHIPS, Bedford (Massachusetts)

implantierbarer Mikrochip



▷ her zum Zusammenklumpen neigen. Denn in verklumpter Form sind die Partikel für die feinen Gefäße in den Lungenbläschen zu groß (siehe Kasten Seite 47). Ein besonders kleiner, ganz einfacher Inhalator könnte solche Aerosole dann tief in die Lunge blasen. Das Prinzip kann man sich verdeutlichen, indem man sich nasse Bälle und im Vergleich dazu nassen Sand vorstellt. Die Bälle verkleben nicht miteinander, die Sandkörner wohl.

Suche nach optimaler Partikelgröße für den Lungenweg

Edwards hoffte zugleich, dass die Makrophagen in der Lunge Partikel dieser Größe nicht so leicht vernichten würden. Denn diese Immunzellen verschlingen vor allem kleinere Teilchen. Tatsächlich ergaben inzwischen Tierstudien, dass Insulin bis zu vier Tage in der Lunge verbleibt, wenn es in solch großen Partikeln verpackt ist. Dazu genügte ein einziger Inhalationsstoß. Gegenwärtig testet die Firma Alkermes aus Cambridge (Massachusetts) zusammen mit pharmazeutischen Unternehmen, unter anderem Eli Lilly, das Verfahren für mehrere Wirkstoffe am Menschen.

Die Zukunft wird weitere wertvolle Ideen liefern. Für besonders interessant unter den jüngsten Forschungen halte ich »intelligente« Darreichungsformen. Solche Systeme sollen auf chemische Signale im Körper reagieren und immer genau so viel Substanz freigeben, dass die Konzentration des Wirkstoffs im gewünschten Bereich bleibt.

Vor Jahren sah ich eine Fernsehsendung über die Fabrikation von Siliziumchips für Computer. Schlagartig erkannte ich, dass sich diese Technologie auch für »intelligente« Medikamentensysteme eignet. Michael J. Cima, Experte für die Verarbeitung von Keramiken am MIT, und ich setzten John T. Santini jr., einen Studenten der Universität von Michigan in Ann Arbor, in einem Sommerforschungsprojekt darauf an. Santini promovierte dann am MIT. Er fand eine Möglichkeit, Mikrochips aus Silizium mit einer Anzahl von Vertiefungen zu fertigen, in die sich ein wenig Medikament einfüllen lässt. Am schmalen Ende verschließt jeden Hohlraum eine dünne Goldfolie. Will man eine Dosis des Medikaments – oder mehrere – verabreichen, löst ein Stromstoß von einem Volt die passende Zahl Verschlüsse auf (siehe Kasten links). Santini ist heute Präsident der Firma MicroCHIPS in Bedford (Massachusetts), die diese Systeme zur Anwendungsreife weiterentwickelt.

Solche Mikrochips ließen sich unter die Haut, ans Rückenmark oder ins Gehirn einpflanzen, wo sie beispielsweise Schmerzmittel oder Chemotherapeutika gegen Krebs liefern könnten. In Tierversuchen haben James Anderson von der Case Western Reserve University in Cleveland (Ohio) und seine Mitarbeiter zeigen können, dass die Materialien der Mikrochips offenbar biologisch gut verträglich sind und voraussichtlich keine Nebenwirkungen verursachen.

Chipbasierte Systeme mit einer kleinen, am Körper tragbaren Energiequelle wären leicht zu bedienen. Zusätzlich könnten sie ein Aufzeichnungsmodul enthalten, das exakt registriert, wie viel von einem Wirkstoff der Patient bekommen hat. Die Daten könnte ein Computer zu Hause, beim Arzt oder im Krankenhaus abgreifen. Die Medikamentengeschichte des Patienten wäre damit stets zugänglich und aktuell. Implantierbare Systeme, welche regelmäßig die Wirkstoffkonzentration im Körper messen und die Dosierung daran anpassen, entwickelt die Firma ChipRx aus Lexington (Kentucky).

Eines Tages sollte es dank der neuen Pharmatechnologien gelingen, jedes Medikament zur richtigen Zeit und in der richtigen Dosierung an die richtige Stelle zu bringen, wo auch immer der Körper die Arznei benötigt. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Robert Langer ist Kenneth-J.-Germeshausen-Professor für Chemie- und Biomedizin-Ingenieurwesen am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge. Er arbeitet in der Leitung einer Reihe von Firmen, darunter Sontra Medical und MicroCHIPS. 2002 bekam er den Charles-Stark-Draper-Preis, der als der Nobelpreis für Ingenieure gilt. 1998 wurde ihm, als einem der »produktivsten Erfinder in der Medizingeschichte«, der Lemelson-MIT-Preis verliehen.

Ultrasound-assisted insulin delivery and noninvasive glucose sensing. Von Joseph Kost in: Diabetes Technology and Therapeutics, Bd. 4, Heft 4, S. 489, 2002

Drug delivery: drugs on target. Von Robert Langer in: Science, Bd. 293, S. 58, 6. Juli 2001

Drug delivery and targeting. Von Robert Langer in: Nature, Bd. 392 (Suppl.), S. 5, 30. April 1998

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Fernsehen doppelt

Der Drang, Vorhandenes zu verbessern, hat jetzt zu einer Erfindung geführt, die zweifellos originell ist ... Es handelt sich um das als Duoscopie bezeichnete Verfahren, zwei verschiedene Fernsehprogramme gleichzeitig auf einem Fernsehschirm abbilden zu lassen und doch getrennt zu sehen. Ohne besondere Vorrichtungen erscheinen gleichsam zwei übereinanderliegende Bilder etwa in der Form von zwei Photoaufnahmen auf einem Negativ. Die Sache sieht auf dem Bildschirm nur noch viel krauser aus, weil die Bilder sich infolge der Bewegung dauernd verändern. ... Man benutzt Polarisationsbrillen, um die beiden Fernsehbilder zu entwirren ... Die Trennung des Tongemisches beider Sendungen ist durch ... geeignete elektrische Filter ohne Schwierigkeiten möglich, wobei sich allerdings ein Qualitätsverlust nicht vermeiden lassen wird. Dazu kommt die Beschränkung des Abhörens durch Kopfhörer. ... Ob die Sache jemals eine Zukunft haben wird, bleibt abzuwarten. *(Orion, 9. Jg., Nr. 5/6, 1954, S. 252)*



◄ Jedem sein Programm, und es gibt nie Streit um die Fernbedienung

Das wird eng



Die Bevölkerung der Erde nimmt nach den Schätzungen der nordamerikanischen »Population Reference Bureau« in jedem Tage um 70 000 Menschen zu. Im Jahre 1953 wuchs die Erdbevölkerung um 25 Millionen an. Man kann berechnen, daß in 100 Jahren auf der Erde 7 Milliarden Menschen leben werden – man schätzt, daß es gegenwärtig 2,5 Milliarden sind –, wenn diese Entwicklung unverändert fortschreitet. *(Deutsche Medizinische Wochenschrift, 79. Jg., Nr. 10, 1954, S. 423)*

Der heiße Draht nach Amerika

England und die USA ... haben gemeinsam ein Telefonkabel entwickelt, mit dem erstmalig der Atlantik durchmessen werden kann; die bisher verlegten unterseeischen Telefonkabel waren höchstens 300 km lang. Das erste Kabel will man 1955 verlegen; dies Unternehmen ist durch einen neuen Kunststoff als Kabel-Isolierungsmaterial – das Verluste an elektrischer Energie praktisch ausschließt – und durch die Konstruktion einer neuartigen Relaiseinrichtung möglich geworden. Die je 50 Relais der beiden 3200 km langen Kabel ... sind derart in das Kabel eingebaut, daß sie die Verlegung vom Kabelschiff nicht behindern, und sie sollen mehr als zwanzig Jahre selbst in Tiefen von 3000 m einwandfrei funktionieren. *(Westermanns Monatshefte, März 1954, S. 82)*



Strahlung überall?

Die Radioaktivität scheint eine ganz allgemeine Eigenschaft vieler Körper zu sein ... Darauf deuten auch die Versuche hin, welche die bekannten Braunschweiger Physiker Elster und Geitel in Kellerräumen angestellt haben. Sie fanden dort die Luft so radioaktiv, daß es ihnen gelang, auf einem frei ausgespannten, negativ elektrisch geladenen Draht genug strahlende Gasausscheidung niederzuschlagen, um damit eine photographische Wirkung auf Bromsilber auszuüben. *(Zeitschrift für die gesamte Kohlensäure-Industrie, 10. Jg., Nr. 6, 1904, S. 158)*

Vom Neandertaler zum Menschen?

Auf Grund eines sorgfältigen Studiums ... zeigt Dr. Moritz Alsberg, daß die Neandertalrasse eine Übergangsform darstellt, die von den Vorfahren des heutigen Menschen zu diesem selbst hinüberführt und auf der aufsteigenden Leiter der Menschwerdung gewissermaßen die vorletzte Sprosse bildet. In Bezug auf den Ursprung des Menschen, d. h. die menschliche Abstammung kommt Alsberg zu dem Schluß, daß von einer Abstammung des Menschen von den Anthropoiden (menschenähnlichen Affen) ... unter keinen Umständen die Rede sein könne, daß es sich beim Menschen überhaupt nicht um eine Affenabstammung handle, daß vielmehr bei demselben nur eine Deszendenz von einem tiefer gelegenen Punkte des großen tierischen Stammbaumes angenommen werden muß. *(Der Stein der Weisen, 31. Bd., 1904, S. 107)*

Mechanische Baumsäge

Eine praktische Dampfsäge zur Verwendung im Freien, ja mitten in Wäldern hat neuerdings eine englische Maschinenfabrik konstruiert und in den Handel gebracht. Der fahrbare Teil der Maschinerie besteht nur aus einem leichten, vertikalen Dampfkessel aus Stahlblech, der mit den Abfällen der Holzfällerei, d. h. kostenlos geheizt wird, und in welchem die Dampfspannung unbedenklich bis auf sieben Atmosphären gesteigert werden kann. Die Sägen selber sind tragbar und können jedesmal an dem zu bearbeitenden Baum befestigt werden ... Das breite und sehr kräftige Sägeblatt wird von einem kleinen ... Dampfkolben hin und her gestoßen und dabei durch eine Schraube und ein Zahnkranzsegment nach Belieben gegen das Holz gepreßt. Das Blatt kann ebensowohl vertikal als horizontal arbeiten, so daß ebensogut stehende als bereits gefällte Bäume damit zu bearbeiten sind ... Die Sägen bringen einen zwei Fuß dicken Stamm in fünf bis sechs Minuten zu Falle. *(Das Neue Universum, 25. Jg., 1904, S. 217)*

▼ Hoffentlich wird's wieder aufgeforstet: Dampfsäger am Werk



Quanten der Raumzeit

Eine neuartige Theorie greift nach dem Gral der theoretischen Physik: die Loop-Quantengravitation. Sie wagt die Vereinigung von Quantenmechanik und Gravitation. Diesem Ansatz zufolge ist der Raum körnig, und sogar die Zeit macht winzige Quantensprünge.

Von Lee Smolin

Bis vor gut einem Jahrhundert hielten die meisten Wissenschaftler an dem Dogma fest, dass die Natur keine Sprünge macht, sondern sich bis ins Kleinste als Kontinuum verhält. Zwar hatten schon einige antike Naturphilosophen argumentiert, die Materie lasse sich nicht unbegrenzt immer feiner unterteilen, sondern bestehe letztlich aus winzigen »Atomen«, nach dem griechischen Wort für »unteilbar«. Doch noch am Ende des 19. Jahrhunderts postulierte eine Autorität wie der österreichische Physiker und Philosoph Ernst Mach, die Existenz solch kleiner Teilchen sei prinzipiell nicht nachweisbar. Heutzutage bilden wir routinemäßig einzelne Atome ab und untersuchen die Partikel, aus denen sie ihrerseits zusammengesetzt sind. Die körnige Struktur der Materie ist für uns eine Selbstverständlichkeit.



DUSAN PETRICIC

In letzter Zeit fragen sich Physiker und Mathematiker, ob nicht auch der Raum aus diskreten Stücken besteht. Ist er kontinuierlich, wie wir in der Schule lernen, oder ähnelt er eher einem Gewebe aus einzelnen Fäden? Würden wir, falls wir nur zu genügend winzigen Größenordnungen vorstoßen könnten, »Atome« des Raumes erblicken – irreduzible Volumenelemente, die sich nicht noch weiter aufspalten lassen? Und wie steht es um die Zeit: Verändert sich die Natur kontinuierlich oder entwickelt sie sich in winzigen Schritten – ähnlich wie ein Computer?

Die letzten Jahre haben in diesen Fragen große Fortschritte gebracht. Eine Theorie mit dem seltsamen Namen Loop-Quantengravitation (*loop* englisch für Schleife) besagt, dass Raum und Zeit tatsächlich aus diskreten Stücken bestehen. Die im Rahmen dieser Theorie ausgeführten Berechnungen ergeben ein zugleich einfaches und schönes Bild. Es vertieft unser Verständnis für rätselhafte Phänomene, die mit Schwarzen Löchern und dem Urknall zusammenhängen. Vor allem ist die Theorie nachprüfbar; sie trifft Vorhersagen für in naher Zukunft ausführbare Experimente, mit denen wir die Atome der Raumzeit – falls es sie gibt – zu entdecken vermögen.

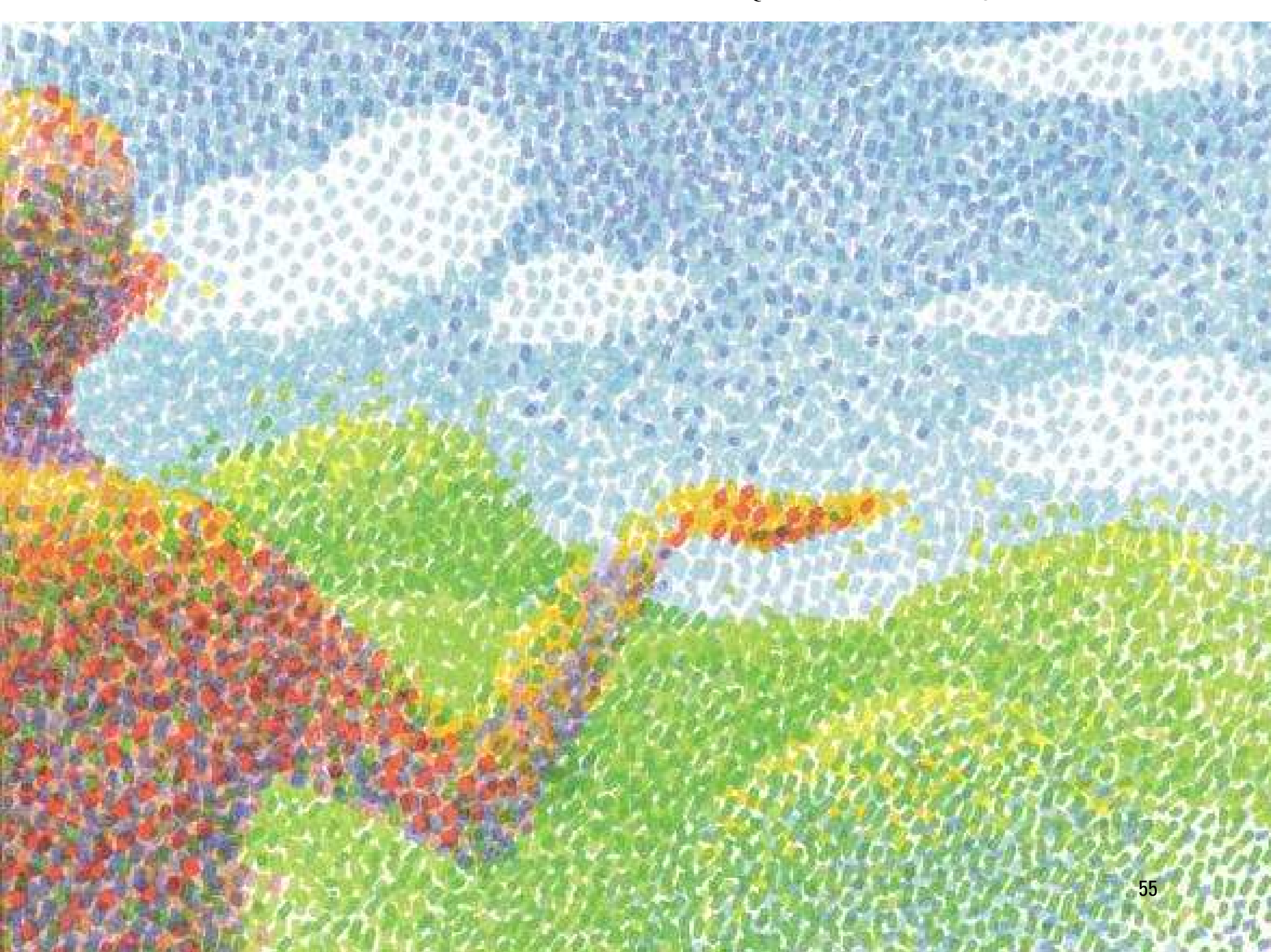
Allzu glatte Relativität

Meine Kollegen und ich entwickelten die Theorie der Loop-Quantengravitation, während wir uns mit einem hartnäckigen Problem der modernen Physik herumschlugen: Wie könnte eine Quantentheorie der Gravitation aussehen? Um zu erklären, was diese Frage mit der Körnigkeit von Raum und Zeit zu tun hat, muss ich ein wenig ausholen.

Die Theorie der Quantenmechanik wurde im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts formuliert; ihre Entwicklung hing eng mit dem Nachweis zusammen, dass die Materie aus Atomen besteht. Die Gleichungen der Quantenmechanik fordern, dass bestimmte Größen wie die Energie eines Atoms nur in bestimmten diskreten Einheiten auftreten. Die Quantentheorie sagt präzise das Verhalten von Atomen und Elementarteilchen voraus sowie die Eigenschaften der zwischen ihnen wirkenden Kräfte. Keine Theorie in der Wissenschaftsgeschichte war erfolgreicher. Sie bildet nicht nur die Grundlage für Atom- und Elementarteilchenphysik, sondern auch für Chemie, Elektronik und sogar Biologie.

Ungefähr zur gleichen Zeit konstruierte Albert Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie, eine Theorie der Gravitation. Einsteins Theorie beschreibt die Schwerkraft als Folge der Krümmung von Raum und Zeit – die eine gemeinsame »Raumzeit« bilden – durch die darin befindliche Materie. Diese Idee lässt sich durch eine Kegelkugel veranschaulichen, die auf einem Gummituch liegt und an der eine Murmel vorbeirollt. Die beiden Kugeln repräsentieren beispielsweise Son- ▷

▼ **Bei extrem hoher Auflösung wird die Welt körnig.**

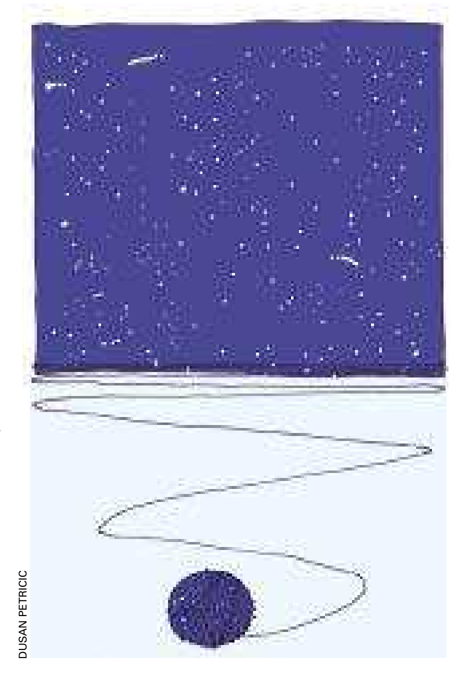


▷ ne und Erde und das elastische Tuch den Raum. Die Kegelkugel erzeugt eine tiefe Senke im Gummituch; dadurch wird die Murmel zu der größeren Kugel hin abgelenkt, als würde sie durch eine Kraft angezogen. In ähnlicher Weise verzerrt jedes Stück Materie oder jede Energieansammlung die Geometrie der Raumzeit derart, dass andere Teilchen oder Lichtstrahlen dorthin abgelenkt werden; dieses Phänomen nennen wir Gravitation.

Sowohl Quantentheorie als auch Allgemeine Relativitätstheorie wurden, jede für sich, durch Experimente großartig bestätigt – aber kein Experiment hat den Bereich erforscht, für den beide Theorien signifikante Effekte vorhersagen. Das Problem ist, dass Quanteneffekte am deutlichsten bei kleinen Größenordnungen zu Tage treten, während allgemeinrelativistische Effekte große Massen erfordern; beide Bedingungen zugleich sind nur in Ausnahmefällen erfüllt.

Mit dieser Lücke in den experimentellen Daten hängt eine prinzipielle Frage zusammen: Die Einstein'sche Theorie ist rein klassisch, das heißt nichtquantenphysikalisch. Soll die Physik insgesamt logisch widerspruchsfrei sein, so muss es eine Theorie geben, die irgendwie Quantenmechanik und Allgemeine Relativitätstheorie vereinigt. Diese dringend – aber bisher vergeblich – gesuchte Theorie heißt Quantengravitation. Weil die Allgemeine Relativitätstheorie die Geometrie der Raumzeit behandelt, muss eine Quantentheorie der Gravitation zugleich eine Quantentheorie der Raumzeit sein.

Die Physiker verfügen über mehrere mathematische Verfahren, um eine klassische Theorie in eine Quantentheorie zu verwandeln. Viele theoretische Physiker



Der Raum ist ein Gewebe aus separaten Fäden.

und Mathematiker versuchten in den 1960er und 1970er Jahren, diese Standardmethoden auf die Allgemeine Relativitätstheorie anzuwenden, aber ohne Erfolg. Offenbar war etwas fundamental Neues erforderlich – zusätzliche Postulate oder Prinzipien, oder neue Teilchen und Felder, oder irgendwelche völlig neue Wesenheiten.

Vielleicht ließ sich mit den richtigen Zutaten oder mit einer neuen mathematischen Struktur eine Art Quantentheorie entwickeln, die sich im nichtquantenphysikalischen Bereich an die Allgemeine Relativitätstheorie annähern würde. Um die erfolgreichen Aussagen von Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie nicht zu verderben, müssten die exotischen Zutaten der neuen Theorie bei den meisten Experimenten verborgen bleiben – außer unter den seltenen Bedingungen, bei denen sowohl Quantentheorie als auch Allgemeine Relativitätstheorie große Effekte erwarten lassen. In dieser Richtung sind mehrere unterschiedliche Versuche unternommen worden, mit Namen wie Twistor-Theorie, Nicht-kommutative Geometrie und Supergravitation.

Ein unter Physikern besonders beliebter Ansatz ist die Stringtheorie; sie postuliert, dass der Raum zusätzlich zu den drei bekannten Dimensionen sechs oder sieben weitere hat, die allerdings noch niemals beobachtet wurden. Die Stringtheorie sagt auch die Existenz vieler neuer Elementarteilchen und Kräfte voraus, für die es bisher keinerlei Anzeichen gibt. Einige Forscher glauben, dass die Stringtheorie Teil einer übergeordneten M-Theorie sei (siehe »Strings – Urbausteine der Natur?« von Pierre Ramond, Spektrum der Wissenschaft 2/2003, S. 24). Doch leider hat niemand eine präzise Definition dieser mutmaßlichen Theorie gegeben. Darum sind einige Physiker und Mathematiker überzeugt, dass nach anderen Modellen gesucht werden muss. Unsere Loop-Quantengravitation ist die am weitesten entwickelte Alternative.

IN KÜRZE

▶ Um die Struktur des Raumes in kleinsten Größenordnungen zu verstehen, müssen wir eine **Quantentheorie der Gravitation** entwickeln – denn gemäß Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie wird die Gravitation durch Verzerrungen von Raum und Zeit verursacht.

▶ Die Theorie der **»Loop-Quantengravitation«** kombiniert die Grundprinzipien der Quantenmechanik und der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die Quantenzustände des Raumes werden durch Diagramme aus Linien und Knoten beschrieben, so genannte **Spin-Netzwerke**. Die Quanten-Raumzeit entspricht ähnlichen Diagrammen, die **Spin-Schäume** heißen.

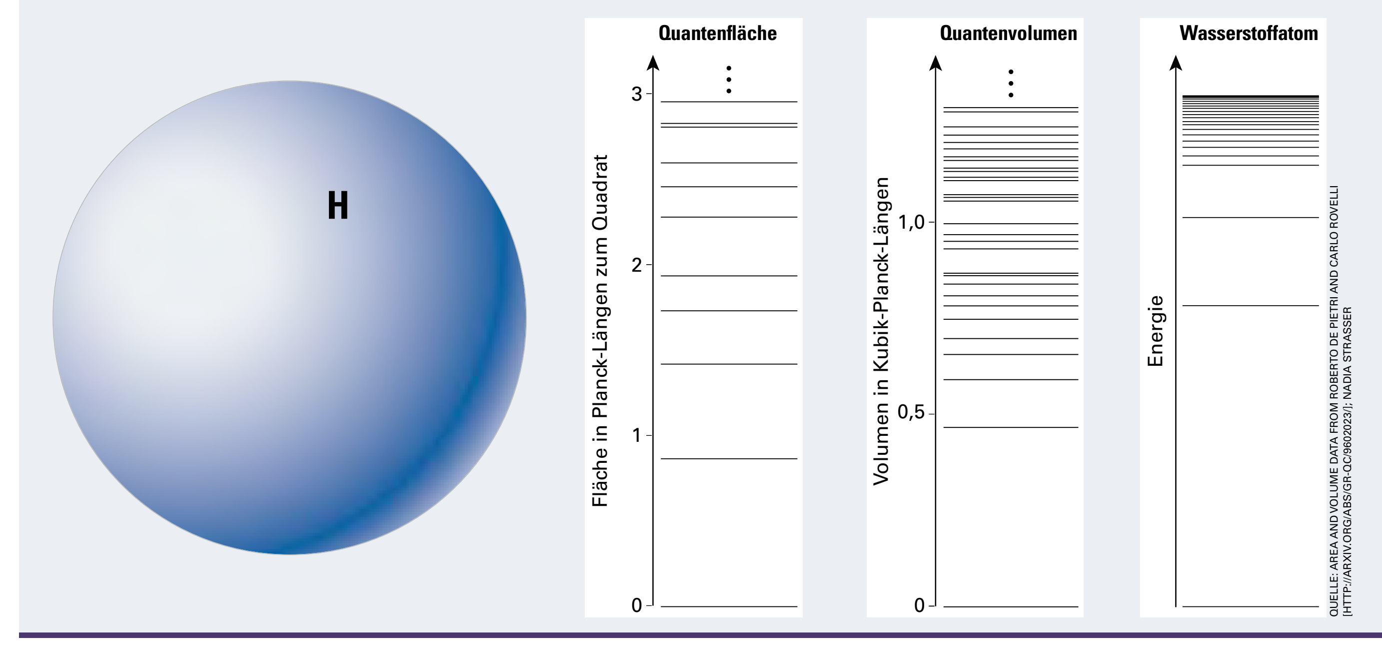
▶ Der Loop-Quantengravitation zufolge besteht der Raum aus diskreten Volumenstücken von der Minimalgröße einer **Kubik-Planck-Länge** (10^{-99} Zentimeter), und die Zeit schreitet in Sprüngen von der Größenordnung einer **Planck-Zeit** (10^{-43} Sekunden) fort. Die Effekte dieser diskreten Raumzeitstruktur könnten schon bald experimentell beobachtbar sein.

Neue Regeln für Raum und Zeit

Mitte der 1980er Jahre beschlossen einige von uns – darunter Abhay Ashtekar, der jetzt an der Pennsylvania State University tätig ist, Ted Jacobson von der University of Maryland und Carlos Rovelli, derzeit an der Université de la Méditerrannée in Marseille –, erneut die Frage zu untersuchen, ob die Quantenmechanik nicht doch mit Hilfe der Standardmethoden widerspruchsfrei mit der Allgemeinen Relativitätstheorie kombiniert werden könnte. Wir wussten, dass das negative Resultat aus den 1970er Jahren ein wichtiges Schlupfloch offen ließ. Die damaligen Berechnungen hatten unterstellt, die Geometrie des Raumes sei selbst bei beliebig starker Vergrößerung kontinuierlich und glatt – so wie man es vor Entdeckung der Atome von der Materie angenommen hatte. Einige unserer Lehrer und Mentoren hatten betont, dass die alten Berechnungen nichts taugten, wenn diese Unterstellung nicht zutraf.

Diskrete Zustände von Fläche und Volumen

In der Theorie der Loop-Quantengravitation sind Flächen und Volumina keine kontinuierlichen Größen. Betrachten wir eine kugelförmige Hülle H, die ein gewisses Raumvolumen umschließt (linke Grafik). In der klassischen – nichtquantenmechanischen – Physik könnte das Volumen eine beliebige positive reelle Zahl sein. Doch gemäß der Loop-Quantengravitation gibt es ein absolutes Minimalvolumen – rund eine Kubik-Planck-Länge oder 10^{-99} Zentimeter –, und auch für größere Volumina sind nur bestimmte Zahlenwerte erlaubt. Ebenso gibt es eine Minimalfläche – rund eine Planck-Länge zum Quadrat oder 10^{-66} Quadratzentimeter – und nur diskrete größere Flächenwerte. Das diskrete Spektrum zulässiger Quantenflächen und -volumina ähnelt den Anregungsenergien eines Wasserstoffatoms (rechte Grafik).



QUELLE: AREA AND VOLUME DATA FROM ROBERTO DE PIETRI AND CARLO ROVELLI (HTTP://ARXIV.ORG/ABS/GR-QC/9602023/); NADIA STRASSER

Also begannen wir nach einem Berechnungsverfahren zu suchen, das keinen glatten und kontinuierlichen Raum voraussetzt. Wir beschlossen, keine Annahmen zu machen, die über die experimentell gut erprobten Prinzipien der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantentheorie hinausgingen. Insbesondere legten wir größten Wert auf zwei Grundprinzipien der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Das erste heißt Hintergrund-Unabhängigkeit. Dieses Prinzip besagt, dass die Geometrie der Raumzeit nicht ein für alle Mal feststeht, sondern eine sich entwickelnde dynamische Größe ist. Um diese Geometrie zu finden, muss man bestimmte Gleichungen lösen, die sämtliche Wirkungen von Materie und Energie enthalten. Die Stringtheorie übrigens ist in ihrer derzeitigen Formulierung nicht hintergrundunabhängig; die Gleichungen für die Strings werden in einer vorher festgelegten klassischen – das heißt nichtquantenphysikalischen – Raumzeit aufgestellt.

Das zweite Prinzip trägt den Ehrfurcht gebietenden Namen Diffeomorphismus-Invarianz und hängt eng mit der Hintergrund-Unabhängigkeit zusammen. Es besagt, dass man ein beliebiges Koordinatensystem wählen darf, um die Raumzeit darzustellen. Ein Punkt in der Raumzeit ist nur durch die physikalischen Vorgänge in diesem Punkt definiert, nicht durch seinen Ort in einem speziellen Koordinatensystem – denn »spezielle« Koordinaten gibt es nicht.

»Loops« – winzige Schleifen

Durch sorgsames Kombinieren dieser beiden Prinzipien mit den Standardverfahren der Quantenmechanik entwickelten wir eine mathematische Sprache, mit deren Hilfe wir berechnen konnten, ob der Raum kontinuierlich oder diskret ist. Zu unserer Freude ergab diese Berechnung einen quantisierten Raum. Wir hatten den Grundstein zu unserer Theorie der Loop-Quantengravitation gelegt. Der Ausdruck »Loop« oder Schleife kommt übrigens daher, dass in dieser Theorie gelegentlich mit winzigen Schleifen in der Raumzeit operiert wird.

Mehrere Physiker und Mathematiker haben diese Berechnungen mit unterschiedlichen Methoden wiederholt. Im Laufe der Jahre hat sich die Loop-Quantengravitation zu einem eigenen Forschungsgebiet entwickelt, an dem viele Theoretiker in aller Welt mitwirken; unsere gemeinsamen Bemühungen bestärken uns in dem Bild der Raumzeit, das ich nun beschreiben werde.

Da es sich dabei um eine Quantentheorie der Raumzeit-Struktur in kleinsten Maßstäben handelt, betrachten wir, was die Theorie über ein kleines Gebiet oder Volumen aussagt. In der Quantenphysik muss man präzise definieren, welche physikalischen Größen gemessen werden sollen. Zu diesem Zweck wählen wir irgendein Gebiet, das durch eine Hülle H markiert ist (siehe Kasten auf dieser Seite).

Die Hülle kann durch Materie definiert sein, etwa eine gusseiserne Hohlkugel oder durch die Geometrie der Raumzeit selbst – zum Beispiel durch den Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs, das heißt durch den Abstand, unterhalb dessen nicht einmal Licht der konzentrierten Schwerkraft zu entkommen vermag.

Was geschieht, wenn wir das Volumen des Gebiets messen? Welche Mess- ▷

▷ resultate sind durch Quantentheorie und Diffeomorphismus-Invarianz überhaupt erlaubt? Wenn die Geometrie des Raumes kontinuierlich ist, könnte das Gebiet beliebig klein sein, und das Messergebnis wäre eine positive reelle Zahl, die beliebig nahe bei Null liegen könnte. Doch bei körniger Geometrie kann die Messung nur diskrete Zahlenwerte ergeben, die nie kleiner werden können als ein bestimmtes minimales Volumen. Dies gleicht der Frage, wie viel Energie die um einen Atomkern kreisenden Elektronen besitzen. Der klassischen Mechanik zufolge ist jeder Energiebetrag möglich, doch die Quantenmechanik erlaubt nur gewisse Energiewerte und verbietet alle, die dazwischen liegen. Der Unterschied ähnelt dem zwischen Messungen an einem kontinuierlich fließenden Medium – etwa Wasser in der klassischen Hydrodynamik – und an einer zählbaren Menge von Wassermolekülen.

Planck-Flächen und Planck-Volumina

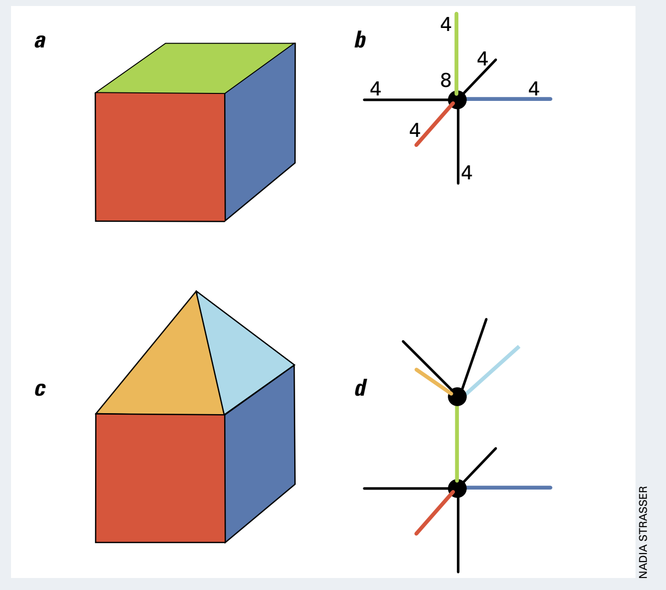
Nach unserer Theorie verhält sich der Raum wie die Atome: Eine Volumenmessung kann nur diskrete Zahlenwerte ergeben. Aber nicht nur das: Auch die Fläche der Hülle H ist diskret. Mit einem Wort, der Raum ist nicht kontinuierlich, sondern existiert in Form von Quanten für Fläche und Volumen.

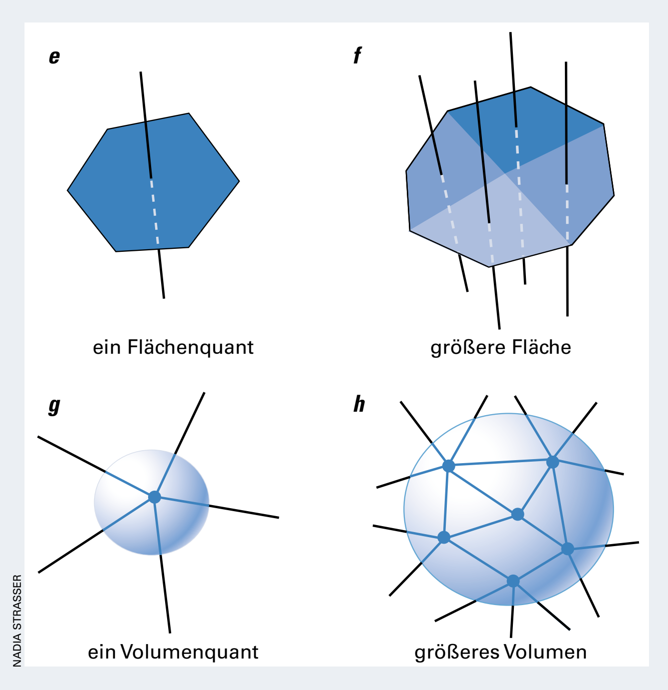
Die möglichen Werte für Volumen und Fläche werden in Einheiten der so genannten Planck-Länge gemessen, die mit der Stärke der Gravitation, der Größe der Quanten und der Lichtgeschwindigkeit zusammenhängt. Die Planck-Länge gibt die Größenordnung an, bei der die Geometrie des Raumes nicht mehr kontinuierlich ist. Diese Zahl ist mit 10^{-33} Zentimetern sehr klein. Die kleinstmögliche Fläche ist ungefähr das Quadrat davon: 10^{-66} Quadratzentimeter, und das kleinste von Null verschiedene Volumen beträgt rund 10^{-99} Kubik-

Veranschaulichung von Quantenzuständen des Volumens

Die Quantenzustände des Raumes werden durch so genannte Spin-Netzwerke dargestellt. Solche Diagramme entsprechen polyederförmigen Volumina. Zum Beispiel wird das Volumen eines Würfels von sechs quadratischen Flächen begrenzt *(a)*. Das entsprechende Spin-Netzwerk besteht aus einem Knoten für das Volumen und sechs Linien für die sechs Flächen *(b)*. Eine Zahl am Knoten zeigt das Volumen des Würfels an, und je eine Zahl pro Linie bezeichnet die Größe der zugehörigen Fläche. Hier beträgt das Volumen acht Kubik-Planck-Längen, und jede Fläche vier Planck-Längen zum Quadrat. Die Regeln der Loop-Quantengravitation schränken die zulässigen Volumina und Flächen durch bestimmte Zahlenkombinationen für Linien und Knoten ein.

Angenommen, auf dem Würfel sitzt eine Pyramide *(c)*. Dann verbindet die Linie, die im Spin-Netzwerk für die Zwischenfläche steht, die zwei Knoten für Würfel und Pyramide *(d)*. Die Linien für die vier freien Pyramidenflächen und für die fünf freien Würfelflächen ragen aus den entsprechenden Knoten; die Zahlen sind hier der Einfachheit halber weggelassen.





Im Allgemeinen wird ein Flächenquant in einem Spin-Netzwerk durch eine Linie dargestellt *(e)*, eine aus vielen Quanten zusammengesetzte Fläche durch viele Linien *(f)*. Ebenso steht ein Knoten für ein Volumenquant *(g)*, während ein größeres Volumen viele Knoten beansprucht *(h)*. Bei einer kugelförmigen Hülle ist das eingeschlossene Volumen durch die Summe aller eingeschlossenen Knoten gegeben und die Größe der Oberfläche durch die Summe aller hindurchstechenden Linien.

Die Spin-Netzwerke sind fundamentaler als die Polyeder: Jede Anordnung von Polyedern kann in dieser Form durch ein Spin-Netz dargestellt werden, aber einige Spin-Netzwerke entsprechen Kombinationen von Volumina und Flächen, die sich nicht als Polyeder zeichnen lassen. Solche Netzwerke entstehen, wenn der Raum durch ein starkes Schwerefeld gekrümmt ist, oder bei Quantenfluktuationen der Raumgeometrie in Planck'schen Größenordnungen.

zentimeter. Somit besagt die Theorie, dass es in jedem Kubikzentimeter des Raumes rund 10^{99} Volumenatome gibt. Zum Vergleich: Das sichtbare Universum enthält »nur« 10^{85} Kubikzentimeter.

Wie sehen die Quantenzustände von Volumen und Fläche aus? Besteht der Raum aus unzähligen kleinen Würfeln oder Kugeln? Ganz so einfach ist es leider nicht. Dennoch können wir die Quantenzustände von Volumen und Fläche grafisch darstellen. Um zu sehen, wie solche Diagramme funktionieren, stellen wir uns ein würfelförmiges Raumstück vor (siehe Kasten auf der vorigen Seite). In unserem Formalismus entspricht diesem Würfel ein Knoten, der das Volumen repräsentiert, sowie sechs davon abstehende Linien, eine für jede Würfelfläche. Neben den Knoten schreiben wir eine Zahl, die das Volumen angibt, sowie neben jede Linie eine Zahl für die Größe der Fläche, die durch diese Linie repräsentiert wird.

Angenommen, wir setzen nun eine Pyramide auf den Würfel. Diese beiden Polyeder mit einer gemeinsamen Fläche werden als zwei Knoten (zwei Volumina) wiedergegeben, die durch eine Linie (die gemeinsame Fläche) verbunden sind. Der Würfel hat noch fünf freie Flächen (fünf abstehende Linien), die Pyramide vier (vier abstehende Linien). Auch kompliziertere Anordnungen lassen sich mit diesen Diagrammen ohne weiteres darstellen: Jedem Polyeder-Volumen entspricht ein Knoten, und die Linien verbinden die Knoten genau so, wie die Flächen die Polyeder verbinden. Mathematiker sprechen bei solchen Diagrammen von Graphen.

In unserer Theorie lassen wir die Zeichnungen der Polyeder weg und behalten nur die Graphen. Die mathematische Beschreibung der Quantenzustände von Volumen und Fläche liefert bestimmte Regeln für die Verbindung von Knoten und Linien sowie für die Zahlen im Diagramm. Jeder Quantenzustand entspricht einem dieser Graphen, und jeder wohl geformte – den Regeln gehorchende – Graph entspricht einem Quantenzustand. Die Graphen sind eine bequeme Kurzschrift für alle möglichen Quantenzustände des Raumes. Leider sind die mathematischen Details zu kompliziert, um sie hier zu diskutieren; wir können nur einige der zugehörigen Diagramme zeigen.

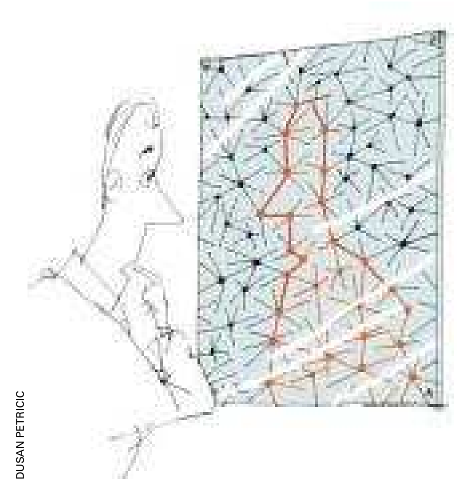
Die Graphen liefern eine bessere Darstellung der Quantenzustände als die Polyeder. Insbesondere enthalten manche Graphen seltsame Verbindungen, die sich nicht in ein sauberes Polyeder-Bild übersetzen lassen. Beispielsweise passen die Polyeder zeichnerisch nicht richtig zusammen, sobald der Raum gekrümmt ist, aber einen Graphen können wir dennoch ohne weiteres zeichnen. Wir können sogar von einem Graphen ausgehend berechnen, wie stark der Raum verzerrt ist. Da die Verformung des Raumes die Gravitation erzeugt, bilden die Diagramme auf diese Weise eine Quantentheorie der Gravitation.

Der Einfachheit halber zeichnen wir die Graphen oft in zwei Dimensionen, doch es ist besser, sie sich dreidimensional vorzustellen, denn sie repräsentieren den Raum. Allerdings lauert hier eine begriffliche Falle: Die Linien und Knoten eines Graphen existieren nicht an bestimmten Orten im Raum. Jeder Graph ist nur durch die Art und Weise definiert, wie seine Teile miteinander und mit wohl definierten Volumengrenzen zusammenhängen. Der kontinuierliche dreidimensionale Raum, in dem man sich die Graphen anschaulich vorstellt, existiert – quasi als separate Bühne – überhaupt nicht. Nur die Linien und Knoten existieren; sie machen den Raum aus, und die Art ihrer Verbindungen definiert die Geometrie des Raumes.

Knoten und Striche

Solche Graphen heißen Spin-Netzwerke, weil die darin stehenden Zahlen mit physikalischen Größen namens Spin verwandt sind. Roger Penrose von der University of Oxford hat Anfang der 1970er Jahre erstmals vorgeschlagen, Spin-Netzwerke für Theorien der Quantengravitation einzusetzen. Erfreulicherweise fanden wir 1994, dass präzise Berechnungen seine Annahme bestätigen. Wer mit Feynman-Diagrammen vertraut ist, sollte übrigens beachten, dass unsere Spin-Netzwerke trotz oberflächlicher Ähnlichkeit nichts damit gemein haben. Feynman-Diagramme repräsentieren quantenmechanische Wechselwirkungen zwischen Teilchen, die von einem Quantenzustand zum anderen fortschreiten. Unsere Diagramme geben zeitlich fixierte Quantenzustände von räumlichen Volumina und Flächen wieder.

Die einzelnen Knoten und Striche des Diagramms repräsentieren extrem kleine Raumgebiete: Ein Knoten entspricht in der Regel einem Volumen von einer Kubik-Planck-Länge, und eine Linie einer



DUSAN PETRICIC

Die Materie existiert als Knoten des Spin-Netzwerks.

Fläche von einer Planck-Länge zum Quadrat. Doch im Prinzip kann ein Spin-Netzwerk beliebig groß und kompliziert sein. Könnten wir den Quantenzustand des Universums detailliert abbilden – seine durch die Schwerkraft von Galaxien, Schwarzen Löchern und allem Übrigen verzerrte räumliche Geometrie –, so käme ein gigantisches, unvorstellbar komplexes Spin-Netz mit rund 10^{184} Knoten heraus.

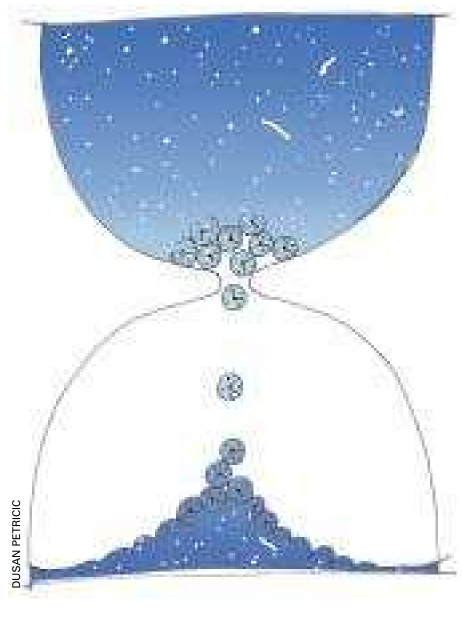
Die Spin-Netzwerke beschreiben zwar die Raumgeometrie – aber was ist mit all der darin enthaltenen Materie und Energie? Wie stellen wir Teilchen und Felder dar, die Orte und Gebiete des Raumes einnehmen? Teilchen, etwa Elektronen, entsprechen bestimmten Typen von Knoten, die durch zusätzliche Beschriftung charakterisiert werden. Felder wie das elektromagnetische werden durch zusätzliche Angaben auf den Linien des Graphen dargestellt. Die Bewegung von Teilchen und Feldern durch den Raum repräsentieren wir, indem wir diese Beschriftungen in diskreten Schritten auf den Graphen verschieben.

Teilchen und Felder sind nicht die einzigen Dinge, die umherwandern. Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie ändert sich die Raumgeometrie mit der Zeit. Die Krümmungen und Biegungen des Raumes variieren mit den Bewegungen von Materie und Energie, und der Raum kann Wellen schlagen wie ein See, über den der Wind streicht (siehe »Jagd auf Gravitationswellen« von Georg Wolschin, Spektrum der Wissenschaft 12/2000, S. 48). In der Loop-Quantengra- ▷

vitation werden diese Prozesse durch Änderungen in den Graphen wiedergegeben. Sie entwickeln sich zeitlich durch eine Abfolge gewisser regelhafter Bewegungen oder »Züge«, mit denen sich die Struktur der Graphen ändert (siehe Kasten auf der nächsten Seite).

Wenn Physiker Quantenphänomene beschreiben, berechnen sie die Wahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Prozesse. Wir tun dasselbe, wenn wir die Loop-Quantengravitation auf Teilchen und Felder anwenden, die sich in den Spin-Netzwerken bewegen, oder auf die zeitlich variable Raumgeometrie selbst. Insbesondere hat Thomas Thiemann vom Perimeter Institute for Theoretical Physics in Waterloo (Ontario, Kanada) präzise Quantenwahrscheinlichkeiten für die Spin-Netzwerk-Bewegungen hergeleitet. Damit wird die Theorie vollständig spezifiziert: Wir gewinnen ein wohl definiertes Verfahren zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit jedes Vorgangs, der in einer Welt, die den Regeln unserer Theorie gehorcht, überhaupt eintreten kann. Man vermag nun rechnerisch vorherzusagen, was in diesem oder jenem Experiment beobachtet werden könnte.

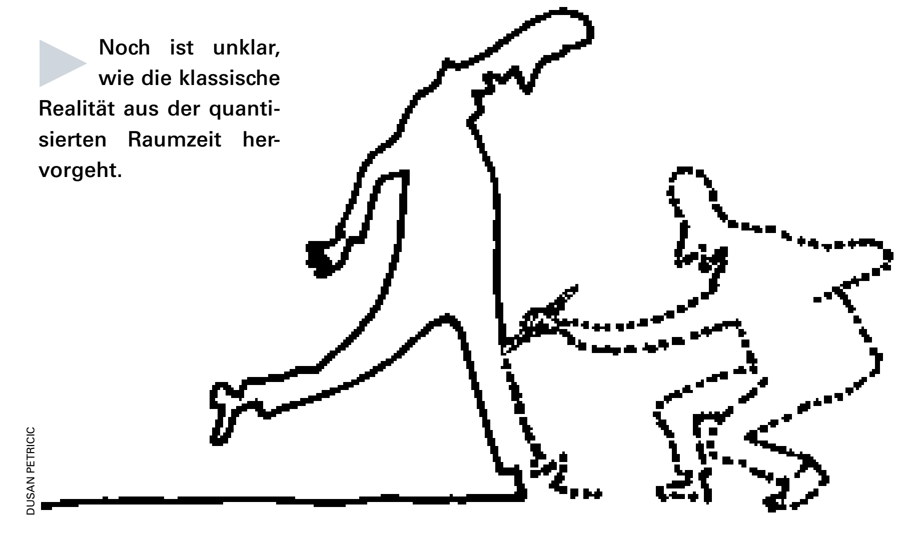
Einsteins Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie vereinen Raum und Zeit zu einer einzigen Raumzeit. Die Spin-Netzwerke, die in der Loop-Quantengravitation den Raum darstellen, passen sich dem Begriff der Raumzeit an, indem sie zu so genannten Spin-Schäumen erweitert werden. Durch Hinzufügen einer weiteren Dimension – der Zeit – verwandeln sich die Linien der Spin-Netzwerke in zweidimensionale Flächen, aus den Knoten werden Linien. Übergänge, bei denen die Netzwerke sich ändern – die oben erwähnten »Züge« –, werden nun durch Knoten dargestellt, an denen die Linien im Schaum einander treffen. Das Spin-Schaum-Bild der Raumzeit wurde von mehreren Forschern entwickelt, darunter Carlo Rovelli, Mike Reisenberger von der Universität Montevideo (Uruguay), John Barrett von der University of Nottingham (Großbritannien), Louis Crane von der Kansas State University, John Baez von der University of California in Riverside und Fotini Markopoulou vom Perimeter Institute.


DUSAN PETRICIC

Die Zeit schreitet mit dem diskreten Ticken unzähliger Uhren fort.

Im Raumzeit-Bild entspricht ein Schnappschuss zu einer bestimmten Zeit einem Schnitt durch die Raumzeit. Ein analoger Schnitt durch einen Spin-Schaum erzeugt ein Spin-Netzwerk. Aber dieser Schnitt bewegt sich nicht kontinuierlich, als würde die Zeit glatt dahinfließen. Vielmehr gilt: So wie der Raum durch die diskrete Geometrie eines Spin-Netzes, wird die Zeit durch die Abfolge diskreter Züge definiert, die das Netzwerk umordnen. Das heißt, auch die Zeit ist nun diskret. Sie fließt nicht wie ein Fluss, sondern tickt wie eine Uhr, wobei jedes Ticken ungefähr einer Planck-Zeit von 10^{-43} Sekunden entspricht. Genauer gesagt, die Zeit im Universum fließt mit dem Ticken unzähliger Uhren. An jedem Ort im Spin-Schaum, an dem ein quantenphysikalischer »Zug« stattfindet, tickt gleichsam eine dort befindliche Uhr einmal.

Die Loop-Quantengravitation macht Aussagen über Raum und Zeit in Planck'schen Größenordnungen, doch dieser Maßstab ist für eine direkte Verifikation der Theorie viel zu klein. Wie können wir die Theorie dann überhaupt nachprüfen? Ein wichtiger Test ist, ob es gelingt, die Allgemeine Relativitätstheorie als klassische Näherung der Loop-Quantengravitation herzuleiten.


DUSAN PETRICIC

Noch ist unklar, wie die klassische Realität aus der quantisierten Raumzeit hervorgeht.

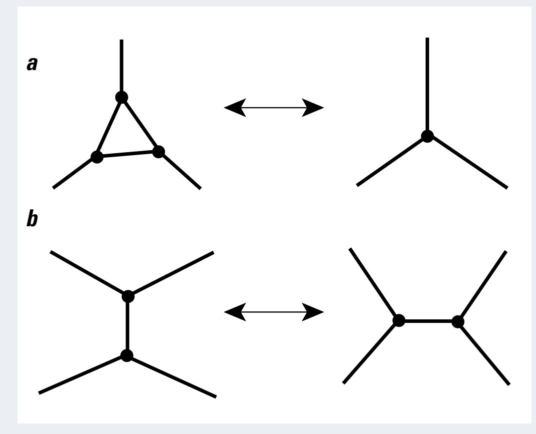
Quantengravitation auf dem Prüfstand

Wenn wir die Spin-Netzwerke mit den einzelnen Fäden in einem Gewebe vergleichen, ähnelt dieser Test der Aufgabe, die elastischen Eigenschaften des Gewebes durch Mitteln über tausende Fäden zu berechnen. Beschreiben Spin-Netzwerke, wenn sie über viele Planck-Längen gemittelt werden, die räumliche Geometrie und ihre zeitliche Entwicklung auf eine Weise, die einigermaßen mit dem »glatten Stoff« der klassischen Einstein'schen Theorie übereinstimmt? Das ist eine knifflige Frage, aber kürzlich sind in einigen Sonderfällen – sozusagen für spezielle Gewebe – Fortschritte erzielt worden. Zum Beispiel lassen sich langwellige Gravitationswellen, die durch einen ansonsten ungekrümmten Raum wandern, als Anregungen spezieller Quantenzustände im Rahmen der Loop-Quantengravitation beschreiben.

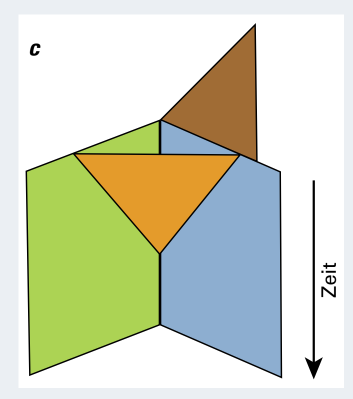
Ein anderer Test untersucht die Frage, was die Loop-Quantengravitation zu einem der hartnäckigen Rätsel der Gravitations- und Quantenphysik zu sagen hat, nämlich zur Thermodynamik Schwarzer Löcher, insbesondere zu deren Entropie. Die Physiker hatten dafür mit einigem Erfolg ein Theoriegemisch ver-

Zeitliche Entwicklung der räumlichen Geometrie

Wenn Materie und Energie oder Gravitationswellen durch den Raum wandern, verändert sich die Geometrie des Raumes. Dies wird durch diskrete Umordnungen – so genannte Züge – des Spin-Netzwerks dargestellt. Beispielsweise kann eine zusammenhängende Gruppe von drei Volumenquanten zu einem einzigen Quant verschmelzen – oder umgekehrt *(a)*. Auch können zwei Volumina ihre Raumaufteilung und ihre Anbindung an benachbarte Volumina verändern *(b)*. Die entsprechenden zwei Polyeder würden zunächst an einer gemeinsamen Fläche zusammenhängen und sich dann wie ein Kristall längs einer anderen Ebene aufspalten. Solche »Züge« im Spin-Netzwerk finden nicht nur bei großen Veränderungen der Raumgeometrie statt, sondern auch als unentwegte Quantenfluktuationen im Planck-Maßstab.

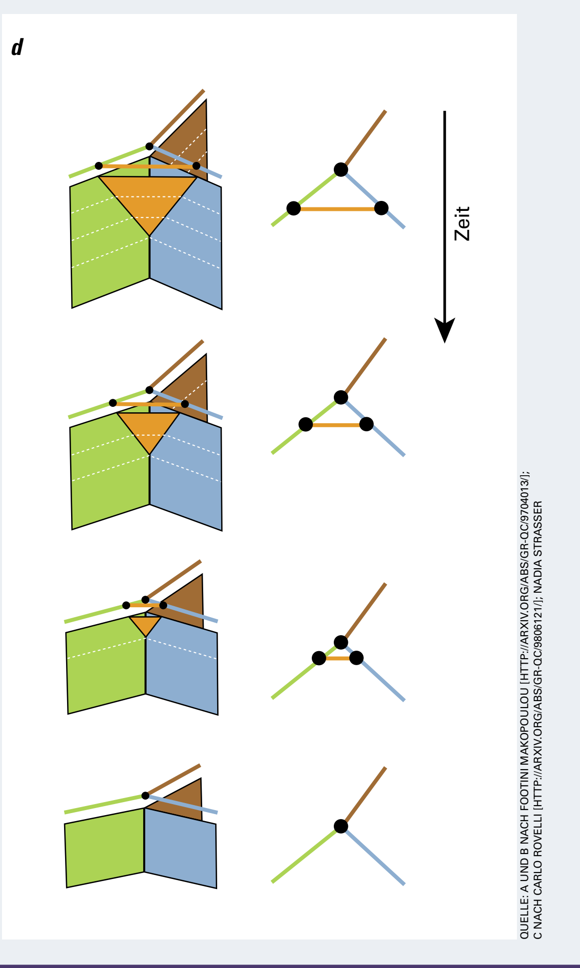


Um diese Züge darzustellen, wird zum Spin-Netzwerk die Zeitdimension hinzugefügt; dadurch entsteht ein Spin-Schaum *(c)*. Aus den Linien des Spin-Netzes werden Flächen, aus den Knoten werden Linien. Ein Schnitt durch einen Spin-Schaum zu einer bestimmten Zeit ergibt wieder ein Spin-Netzwerk; eine Folge von Schnitten zu verschiedenen Zeiten entspricht Einzelbildern eines Films, der die zeitliche Entwicklung des Spin-Netzes wiedergibt *(d)*. Man beachte: Die Entwicklung ist diskontinuierlich. Alle Spin-Netze, welche die orangerote Linie enthalten – die ersten drei Einzelbilder –, stellen exakt dieselbe Raumgeometrie dar. Die Länge der Linie spielt keine Rolle. Für die Geometrie zählt nur, wie die Linien verbunden sind und welche Zahlen sie tragen; dadurch ist definiert, wie die Volumen- und Flächenquanten sich arrangieren und wie groß sie sind.



Darum bleibt im »Film« *(d)* in den ersten drei Einzelbildern die Geometrie mit drei Volumenquanten und sechs Flächenquanten konstant. Erst im letzten Einzelbild springt sie zu einem einzigen Volumenquant und drei Flächenquanten. So entwickelt sich in einem Spin-Schaum die Zeit nicht als kontinuierlicher Fluss, sondern durch eine Folge von abrupten Zügen.

Der Vergleich solcher Folgen mit den Einzelbildern eines Films ist zwar anschaulich, aber korrekter lässt sich die zeitliche Evolution der Geometrie als diskretes Ticken einer Uhr verstehen. Bei einem Tick ist das orangefarbige Flächenquant da, beim nächsten Tick ist es verschwunden – eigentlich wird das Ticken durch das Verschwinden dieses Flächenquants definiert. Der Zeitabstand von einem Tick zum nächsten beträgt ungefähr eine Planck-Zeit oder 10^{-43} Sekunden. Aber dazwischen existiert die Zeit nicht; es gibt so wenig ein »Dazwischen«, wie es Wasser zwischen zwei benachbarten Wassermolekülen gibt.



QUELLE: A UND B NACH FOOTINI MAKOPOULOU [HTTP://ARXIV.ORG/ABS/GR-QC/9704013/]; C NACH CARLO ROVELLI [HTTP://ARXIV.ORG/ABS/GR-QC/9806121/]; NADIA STRASSER

wendet, bei dem zwar die Materie quantenmechanisch behandelt wird, aber die Raumzeit nicht. Eine komplette Quantentheorie der Gravitation wie die Loop-Quantengravitation sollte zumindest die bisherigen Ergebnisse reproduzieren können. Schon in den 1970er Jahren folgerte Jacob D. Bekenstein, der jetzt an der Hebräischen Universität Jerusalem lehrt, dass Schwarze Löcher eine Entropie besitzen, die proportional zur Fläche ihres Ereignishorizonts ist (siehe »Das holografische Universum« von Jacob D. Bekenstein, Spektrum der Wissenschaft 11/2003, S. 34). Kurz darauf zeigte Stephen Hawking, dass Schwarze Löcher Strahlung emittieren müssen. Diese Vorhersagen zählen zu den wichtigsten Resultaten der theoretischen Physik in den letzten dreißig Jahren.

Um die Berechnungen mittels Loop-Quantengravitation durchzuführen, wählen wir als Hülle H den Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs. Wenn wir die Entropie der betreffenden Quantenzustände analysieren, erhalten wir exakt die Bekenstein-Formel. Ebenso reproduziert unsere Theorie Hawkings Aussage über die Strahlung Schwarzer Löcher; sie macht sogar zusätzliche Aussagen über ▷

▷ die Feinstruktur der Hawking-Strahlung. Falls jemals ein mikroskopisches Schwarzes Loch beobachtet würde, könnten diese Aussagen anhand der Strahlung, die es emittiert, geprüft werden. Das kann aber noch lange dauern, denn wir besitzen keine Technik zur Herstellung Schwarzer Löcher, ob groß oder klein.

Auf den ersten Blick mutet jeder experimentelle Test der Loop-Quantengravitation wie ein Ding der Unmöglichkeit an, denn die charakteristischen Effekte werden erst im Planck-Maßstab bedeutsam. Das liegt 16 Größenordnungen jenseits dessen, was die derzeit geplanten Teilchenbeschleuniger zu erforschen vermögen, denn sie brauchen umso mehr Energie, je kleiner die untersuchten Strukturen sein sollen. Weil der Planck-Maßstab mit irdischen Beschleunigern nicht zu erreichen ist, hegten viele Beobachter bis vor kurzem kaum Hoffnung, jemals eine Bestätigung für Theorien der Quantengravitation zu erleben.

Doch in den letzten Jahren haben einige fantasievolle junge Forscher neue Methoden erdacht, die Vorhersagen der Loop-Quantengravitation mit heutigen Mitteln zu testen. Dabei geht es um die Ausbreitung des Lichts im Universum. Wenn Strahlung ein Medium durchquert, wird ihre Wellenlänge verändert; dadurch kommt es beispielsweise zur Brechung von Licht in Wasser und zur Aufspaltung verschiedener Wellenlängen zu einem farbigen Spektrum. Solche Effekte treten auch auf, wenn Licht und Teilchen den diskreten Raum eines Spin-Netzwerks durchqueren.

Winziger Effekt, riesige Entfernung

Leider ist die Größe der Effekte proportional zum Verhältnis der Planck-Länge zur Wellenlänge. Für sichtbares Licht ist dieser Wert kleiner als 10^{-28}, und selbst für die energiereichsten jemals beobachteten kosmischen Strahlen beträgt er nur rund ein Milliardstel. Für jede nachweisbare Strahlung sind die Effekte der körnigen Raumstruktur zwar äußerst gering, doch zum Glück akkumulieren sie sich, wenn das Licht große Entfernungen zurücklegt – und wir beobachten Licht und Teilchen, die Milliarden Lichtjahre unterwegs waren, etwa von Gammastrahlen-Ausbrüchen (Spektrum der Wissenschaft 3/2003, S. 48).

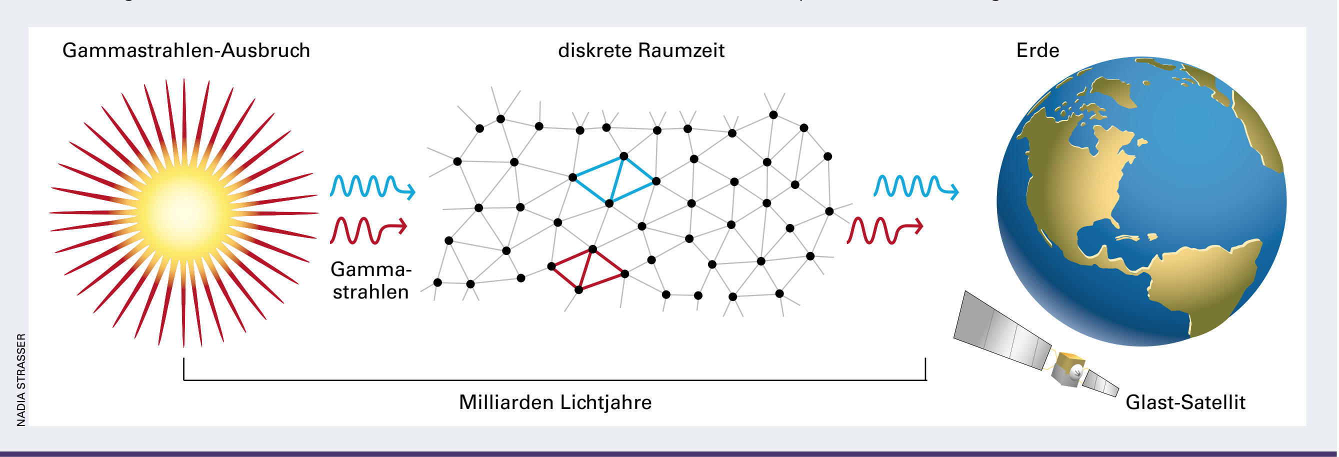
Ein solcher *Gamma Ray Burst* speit in einer sehr kurzen Explosion Photonen unterschiedlicher Energie aus. Nach Berechnungen von Rodolfo Gambini von der Universität der Republik Uruguay, Jorge Pullin von der Louisiana State University und anderen sollten die Photonen je nach ihrer Energie geringfügig verschiedene Geschwindigkeiten haben und darum zu etwas unterschiedlichen Zeiten ankommen (siehe Kasten auf dieser Seite). Wir können im Prinzip diesen Effekt in den Satellitendaten über *Gamma Ray Bursts* aufspüren. Bislang liegt die Messgenauigkeit zwar noch um den Faktor Tausend zu tief, aber ein für 2006 geplantes Satellitenobservatorium namens Glast *(Gamma-ray Large Area Space Telescope)* wird die erforderliche Präzision aufbringen.

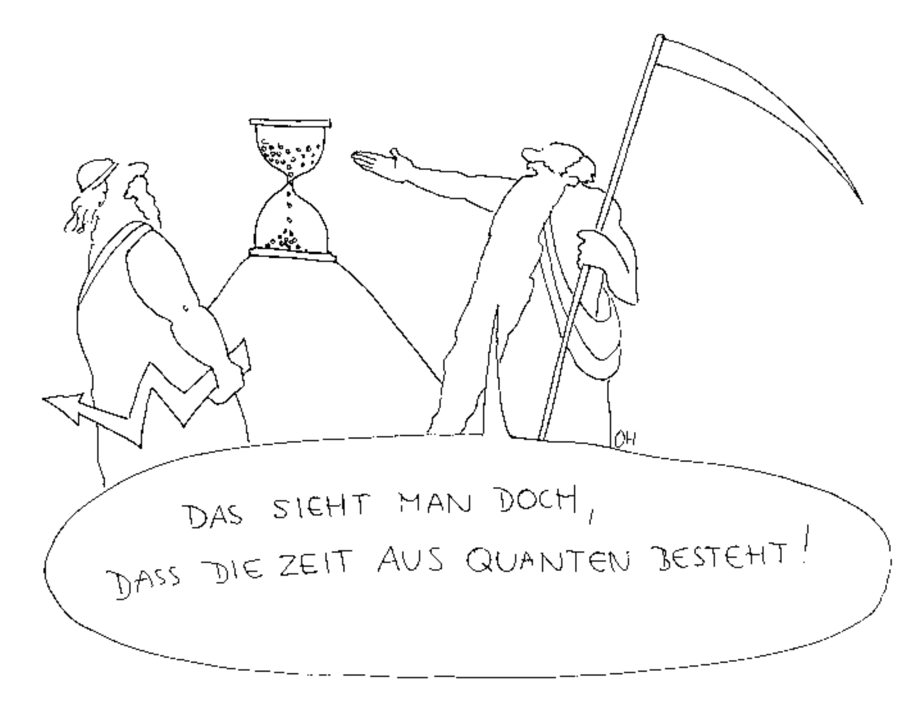
Bedeutet dieses Resultat, dass Einsteins Spezielle Relativitätstheorie mit ihrem Postulat einer universellen Vakuum-Lichtgeschwindigkeit falsch ist? Mehrere Forscher, unter ihnen Giovanni Amelino-Camelia von der Universität Rom, João Magueijo vom Imperial College in London und ich, haben modifizierte Versionen der Einstein'schen Theorie entwickelt, die hochenergetische Photonen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit zulassen. Unsere Theorien besagen, dass die universelle Lichtgeschwindigkeit nur für Photonen niedriger Energie exakt gilt, das heißt für langwelliges Licht.

Ein weiterer möglicher Effekt der diskreten Raumzeit betrifft sehr energiereiche kosmische Strahlen. Seit mehr als dreißig Jahren wird angenommen, kos-

Eine Bewährungsprobe für die Loop-Quantengravitation

Die Strahlung so genannter Gammastrahlen-Ausbrüche – Milliarden Lichtjahre weit entfernter kosmischer Explosionen – könnte schon in naher Zukunft einen Test für die Loop-Quantengravitation ermöglichen. Solche *Gamma Ray Bursts* emittieren binnen kürzester Zeit riesige Mengen energiereicher Photonen. Gemäß der Loop-Quantengravitation besetzt jedes Photon, während es durch den Raum wandert, in jedem Augenblick ein gewisses Liniengebiet im Spin-Netzwerk – in Wirklichkeit nicht nur fünf Linien wie abgebildet, sondern sehr viel mehr. Auf Grund der diskreten Struktur des Raumes pflanzen sich Gammastrahlen höherer Energie ein wenig schneller fort als solche niedrigerer Energie. Der Unterschied ist winzig, aber im Laufe einer Milliarden Jahre langen Reise summiert er sich zu einem merklichen Effekt. Falls die Gammastrahlen eines *Bursts* je nach ihrer Energie zu etwas unterschiedlichen Zeiten bei uns ankommen, ist das ein Indiz für die Loop-Quantengravitation. Der Glast-Satellit, der 2006 in die Umlaufbahn gebracht werden soll, wird die für diesen Test erforderliche Empfindlichkeit aufbringen.





mische Protonen mit Energien über 10^{19} Elektronenvolt würden von der kosmischen Hintergrundstrahlung so stark gestreut, dass sie niemals die Erde erreichen. Seltsamerweise hat ein japanisches Experiment namens Agasa mehr als zehn kosmische Strahlen mit Energien oberhalb dieser Grenze entdeckt. Wie sich zeigt, kann die diskrete Struktur des Raumes die für die Streuung erforderliche Energie anheben, wodurch kosmische Protonen entsprechend höherer Energie bis zur Erde gelangen können. Falls die Agasa-Daten sich bestätigen und keine andere Erklärung gefunden wird, könnte sich herausstellen, dass wir die Quantelung des Raumes bereits entdeckt haben.

Die Loop-Quantengravitation macht nicht nur Aussagen über spezielle Phänomene wie hochenergetische kosmische Strahlen, sondern eröffnet auch neue Perspektiven für kosmologische Grundfragen. Was geschah beispielsweise unmittelbar nach dem Urknall? Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie gab es einen Anfangszeitpunkt, aber diese Schlussfolgerung aus einer klassischen Theorie ignoriert naturgemäß die Quantenphysik. Kürzlich haben Loop-Rechnungen von Martin Bojowald vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Golm ergeben, dass der Urknall *(big bang)* eigentlich ein Urprall *(big bounce)* war; vor diesem Prall zog sich das Universum rapide zusammen. Theoretiker suchen gegenwärtig Aussagen über das frühe Universum zu entwickeln, die durch künftige kosmologische Beobachtungen überprüfbar sein könnten. Vielleicht erhalten wir noch zu unseren Lebzeiten Indizien für eine Zeit vor dem Urknall.

Eine ebenso tiefgründige Frage betrifft die kosmologische Konstante – eine positive oder negative Energiedichte, die den »leeren« Raum gleichmäßig erfüllt. Beobachtungen der letzten Jahre an weit entfernten Supernovae und am kosmischen Strahlungshintergrund liefern starke Indizien für eine positive Energiedichte, welche die Expansion des Universums beschleunigt (siehe »Die Quintessenz des Universums« von Jeremiah P. Ostriker und Paul J. Steinhardt, Spektrum der Wissenschaft 3/2001, S. 32). Wie Hideo Kodama von der Universität Kyoto (Japan) in den 1990er Jahren zeigte, lässt sich eine positive Energiedichte zwanglos aus der Loop-Quantengravitation herleiten; Kodamas Gleichungen beschreiben einen exakten Quantenzustand eines Universums mit positiver kosmologischer Konstante.

Kosmologische Konsequenzen

Viele Fragen sind noch offen. Manche sind rein technischer Natur, andere rütteln an den Fundamenten der Physik. So wüssten wir gern, ob – und wenn ja, wie – die Spezielle Relativitätstheorie bei extrem hohen Energien modifiziert werden muss; bisher hängen unsere diesbezüglichen Spekulationen nur lose mit der Loop-Quantengravitation zusammen. Außerdem hätten wir gern die Gewissheit, dass die klassische Allgemeine Relativitätstheorie unter allen Umständen eine gute Approximation unserer Theorie für Abstände weit oberhalb der Planck-Länge ist. Derzeit wissen wir nur, dass sie eine gute Näherung für bestimmte Zustände ist, die eher schwache Gravitationswellen in einer ansonsten flachen Raumzeit beschreiben. Und schließlich möchten wir herausfinden, ob die Loop-Quantengravitation uns einen Weg zur Vereinigung aller Naturkräfte weist: Sind sie alle, die Gravitation eingeschlossen, Aspekte einer einzigen fundamentalen Kraft? Die Stringtheorie beruht auf einer speziellen Vorstellung von Vereinheitlichung, während wir mit Hilfe der Loop-Quantengravitation eine andere Vereinigungsstrategie verfolgen.

Weil unsere Theorie keine Zusatzannahmen außer den Grundprinzipien von Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie macht, halten wir sie für die plausibelste Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die radikale Neuerung, die sie einführt – eine diskontinuierliche, durch Spin-Netzwerke und Spin-Schäume beschriebene Raumzeit –, wird nicht ad hoc postuliert, sondern geht aus der Mathematik der Theorie selbst hervor.

Dennoch bleibt alles, was ich hier diskutiert habe, vorläufig reine Theorie. Möglicherweise ist der Raum auch in beliebig kleinen Größenordnungen kontinuierlich. Dann wären die Physiker auf radikalere Postulate angewiesen, etwa auf die der Stringtheorie. Da wir hier Wissenschaft betreiben, wird darüber letztlich das Experiment entscheiden – und das könnte schon erfreulich bald sein. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE


Lee Smolin ist Forscher am Perimeter Institute for Theoretical Physics in Waterloo (Ontario, Kanada) und lehrt Physik an der University of Waterloo. Er promovierte an der Harvard University und war an den US-amerikanischen Universitäten Yale, Syracuse und Pennsylvania State tätig. Außer Quantengravitation interessieren ihn Teilchenphysik, Kosmologie und die Grundlagen der Quantentheorie.

Warum gibt es die Welt? Die Evolution des Kosmos. Von Lee Smolin. Deutscher Taschenbuch Verlag, München 2002.

Welcome to quantum gravity. Special Section in: Physics World, Bd. 16, S. 27 (2003)

The quantum of area? Von John Baez in: Nature, Bd. 421, S. 702 (2003)

Three roads to quantum gravity. Von Lee Smolin. Basic Books, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AGGRESSION

Pjotr Kropotkin oder Konrad Lorenz?

Seit jeher streiten die Gelehrten, ob der Mensch von Natur aus »böse« sei: Ist sein tierisches Erbe eine gefährliche Last, die durch soziale Zwänge nur mühsam im Zaum gehalten wird?

Von Melanie Killen und Marina Cords

Tag für Tag werden uns aus aller Welt Ausbrüche von Hass und Gewalt gemeldet, und unweigerlich drängt sich die Frage auf, ob aggressives Verhalten zur menschlichen Natur gehört. Vielleicht ist das der Fall. Doch zum Ausgleich – so unsere These – gibt es auch eine ebenso starke Tendenz zur Kooperation. So argumentierte schon vor einem Jahrhundert der russische Anarchist Pjotr Alexejewitsch Kropotkin: In seinem Werk »Gegenseitige Hilfe in der Tier- und Menschenwelt« (1904) postulierte er einen natürlichen Hang zur Hilfsbereitschaft.

Solche Ansichten relativieren die einseitige Vorstellung, nur aggressives Verhalten habe tiefe biologische Wurzeln. Molekularbiologen suchen bei Mäusen nach Genen, welche die Aggressivität steuern – in der Annahme, ähnliche Mechanismen seien auch beim Menschen wirksam. Immer wieder haben Naturforscher Parallelen zum Verhalten der Tiere gezogen, um die eher »wilden« Verhaltensmuster des Menschen zu erklären. Besonders populär wurde diese Idee durch den österreichischen Zoologen und Nobelpreisträger Konrad Lorenz; 1963 erschien sein Klassiker »Das sogenannte Böse. Zur Naturgeschichte der Aggression«.

Nach Lorenz ist eine gewisse streitlustige Veranlagung bei den meisten Lebewesen eine notwendige, da ungemein nützliche Charaktereigenschaft: Sie hilft dem Männchen, Ressourcen zu erobern, und dem Weibchen, seinen Nachwuchs zu beschützen. Ausgehend von der Vorstellung von Aggression als »animalischem« Grundinstinkt lag es für Lorenz und seine Nachfolger nahe, auch menschliches Verhalten mit diesem Prinzip zu erklären. Die unzähligen Gewaltakte, die tagtäglich Schlagzeilen liefern, scheinen solche Hypothesen zu bestätigen.

Doch gegen diese verbreitete Ansicht sprechen zahlreiche entwicklungspsychologische Studien. Bei Konflikten bricht unter Kindern nämlich keineswegs zwangsläufig aggressives Verhalten aus. Vielmehr nutzen sie vielfältige Strategien, um Streit zu vermeiden, zu mildern oder beizulegen und die Folgen für ihre Sozialbeziehungen möglichst gering zu halten.

Das soll gewiss nicht heißen, die Interaktionen zwischen Kindern wären stets friedfertig. Vielmehr geht es um die Erkenntnis, dass Konflikte keineswegs nur ein asozialer Störfaktor sind wie im Aggressionsmodell. Streit kann Kindern helfen, den Standpunkt des anderen einzunehmen, Kompromisse auszuhandeln und von selbst Begriffe wie Gleichheit und Gerechtigkeit zu bilden.

Kindliches Verhandlungstalent

Beispiele für die sozialen Fertigkeiten von Kindern liefert eine Studie, die eine von uns (Killen) zusammen mit Elliot Turiel von der Universität von Kalifornien in Berkeley durchgeführt hat. Wir ließen drei vierjährige Kinder jeweils 15 Minuten lang unbeaufsichtigt miteinander spielen. Eine Videokamera



MELANIE KILLEN

Kinder teilen ihre Spielsachen (links), Schimpansen teilen ihr Futter (unten). Solche Szenen belegen, dass es instinktive Neigungen zu Gemeinschaftssinn und Kooperation gibt.

zeichnete unter anderem folgende aufschlussreiche Szene auf:

Ruth *(hält zwei Spielzeugfiguren hoch)*: He, ich will das grüne Männchen. Wollen wir tauschen? Hier, das kannst du haben. *(Ruth legt Michael ein blaues Männchen hin.)* Und ich krieg das grüne, okay? *(Ruth greift nach dem grünen Männchen in Michaels Hand.)*
Michael *(hält das grüne Männchen fest)*: Nein! Wir haben schon getauscht. Ich will das da. Ich will es jetzt, und du hast es ja auch schon gehabt.
Lily: He, ihr beide könnt meine Löffel haben, wenn ihr wollt. *(Lily zeigt Michael und Ruth ihre Löffel.)*
Ruth: Nein, ich will das grüne Männchen.
Michael *(lehnt sich über seine Spielsachen)*: Ich geb gar nichts her.
Lily *(singend)*: Ich geb gar nichts her.
Ruth *(singend)*: Ich geb gar nichts her.
Lily: Das ist aber nicht fair, ich hab nämlich überhaupt kein Männchen.
Michael *(zu Ruth)*: Gib du ihr eins davon.
Ruth: Aber du hast drei und sie hat keins und ich hab eins. Das ist nicht fair.
Lily: Ja, weil ich keins hab.
Ruth *(zu Michael)*: Weißt du was? Wenn du mir das grüne gibst, dann geb ich ihr das rote, und dann hat jeder eins.
Michael: Wenn du mir nicht das rote gibst, dann lade ich dich nicht zu meinem Geburtstag ein!
Lily: Aber ich hab überhaupt kein Männchen!
Ruth *(zu Lily)*: Gut, ich geb dir das und ich



FRANS DE WAAL, YERKES PRIMATE CENTER

nehm das von Michael und dann hat jeder eins. Okay?
Michael *(gibt Ruth das orangefarbene Männchen)*: Okay. Aber morgen tauschen wir dann wieder!
Ruth *(singend)*: Geburtstag! *(Sie nimmt das orangefarbene Männchen von Michael und gibt Lily das rote.)*
Lily *(singend)*: Geburtstag!
Michael *(singend)*: Geburtstag!

Dieser Ausschnitt gibt eine Ahnung von der – oft unterschätzten – Komplexität kindlicher Sozial- und Moralkompetenz. Durch eine Fülle von Strategien sorgen Lily, Ruth und Michael dafür, dass die Interaktion in Fluss bleibt: Vorschläge zur Zusammenarbeit (»Wollen wir tauschen?«), moralische Rechtfertigungen (»Das ist nicht fair, weil ...«), Interventionen von dritter Seite (»He, ihr beide könnt meine Löffel haben«), Kompromisse (die Kinder bekommen andere Spielsachen als die gewünschten), Rituale (singen), Eigentumsansprüche (»Du hast es schon gehabt«), Drohungen (»Dann lade ich dich nicht zu meinem Geburtstag ein«) und Tauschhandel (»Ich geb dir das und ich nehm das«). Zwar verfolgen die Kinder manchmal eigene Interessen, aber sie geben sich große Mühe, der ganzen Gruppe gerecht zu werden.

Ruth, Lily und Michael sind keine Ausnahmekinder. In mehr als 2000 Gesprächen zwischen Kindern, die ohne Erwachsene in einem Zimmer spielten, kamen Befehle und Unnachgiebigkeit seltener vor als kooperative Äußerungen, in denen ein Kind einen Vorschlag machte oder mit anderen verhandelte.

Interessanterweise änderte sich die Situation dramatisch, sobald beim Spielen ein Erzieher anwesend war. Dieselben Kinder schienen nun viel weniger in der Lage, ihre Interessen durch Geben und Nehmen auszugleichen. Anstatt miteinander zu verhandeln, riefen sie bei aufkommenden Streitigkeiten den Erwachsenen zu Hilfe, drohten mit seinem Einschreiten oder ließen das Thema einfach fallen. Offensichtlich haben kleine Kinder zwar durchaus Möglichkeiten, Konflikte zu vermeiden oder zu lösen, doch in den meisten Kindergärten und Vorschulen gibt man ihnen kaum Gelegenheit, diese Fertigkeiten zu üben – vielleicht weil die Erzieher glauben, ihre Schützlinge würden ohne Aufsicht den aggressiven »animalischen« Instinkten freien Lauf lassen.

Wir hingegen glauben, dass Kinder von Natur aus sozial begabt sind. Natürlich ist es sehr schwierig, die angeborenen Eigenschaften eines Kindes von den erlernten zu unterscheiden. Viele Eltern berichten von langwierigen Versuchen, ihren Kindern das Teilen und Nachgeben beizubringen. Vermutlich werden diese Erziehungsmaßnahmen ihre Wirkung nicht völlig verfehlt haben. Wir müssen also fragen: Gibt es Hinweise darauf, dass positives Sozialverhalten nicht einzig und allein auf Erziehung zurückzuführen ist? Das ist aber so kaum zu beantworten, denn welches Kind wächst schon völlig unbeeinflusst von Erwachsenen auf. Zum Glück liefern uns Primatenforscher ein fehlendes Puzzlestück: Das Verhalten unserer nächsten Verwandten im Tierreich stützt die Vermutung, dass unsere sozialen Eigenschaften tatsächlich eine biologische Grundlage haben.

Schimpansen, Gorillas und Orang-Utans stehen oft vor ganz ähnlichen Problemen wie spielende Kinder. Sie sind immer wieder uneins, was sie wann mit wem tun wollen oder wohin die ganze Gruppe ziehen soll. Und wie unsere Kinder kennen auch sie vielerlei Mittel und Wege, um Spannungen zu verhindern oder zu entschärfen.

Versöhnliche Schimpansen

Diese Erkenntnis keimte in den 1970er Jahren anlässlich der eher zufälligen Beobachtung, dass Schimpansen, die kurz zuvor heftig gestritten hatten, einander umarmten und küssten. Solche versöhnlichen Gesten brachten Primatenforscher um Frans de Waal von der Emory University in Atlanta (Georgia) auf die Idee, das Konfliktmanagement nach Aggressionsausbrüchen systematisch zu untersuchen.

Wie die Forscher herausfanden, geben die Kontrahenten nach einem Streit meist binnen weniger Minuten Friedenssignale. Sorgfältige Beobachtungen und Verhaltensexperimente zeigen, wie solche Versöhnungstreffen die freundschaftlichen Beziehungen wiederherstellen und die Angst mildern, die bei den Rivalen nach einem Kampf zurückbleibt. Wie unsereins vermögen auch diese Tiere Streitigkeiten von vornherein abzuwenden.

Beispielsweise überlassen viele Primaten einem besonders kräftigen Tier den Vortritt am Futterplatz: Ein untergeordnetes Gruppenmitglied wird ohne Protest nachgeben, sobald sich das dominante Tier nähert. In anderen Situationen gilt das Vorrecht des Finders: Wenn ein Untertan einen begehrten Gegenstand davontragen kann, darf er ihn behalten, ohne dass ihm ein Machthaber den Besitz streitig macht.

Diese Forschung regte auch die Suche nach ähnlichen Friedensstrategien beim Menschen an. Beispielsweise fanden Marina Butovskaya und ihre Mitarbeiter an der Russischen Staatsuniversität für Humanwissenschaften in Moskau im Rahmen einer kulturvergleichenden Studie bei Kindern aus Russland, den USA, Italien, Schweden und Kalmückien ein breites Spektrum friedensstiftender Maßnahmen: Nach einem Streit boten die Kinder Umarmungen an, wollten teilen, skandierten versöhnliche Kinderverse oder bezogen Dritte als Vermittler ein.

Solche Ergebnisse sind für Primatenforscher keine Überraschung, denn sie haben das allzu simple Bild vom angeborenen Aggressionsinstinkt bereits aufgegeben. Vielleicht sollten wir endlich aufhören, »das Böse« unter fälschlicher Berufung auf die Wissenschaft als »anthropologische Konstante« hinzunehmen. ◁

AUTORINNEN




Melanie Killen (links) ist Professor of Human Development sowie stellvertretende Direktorin am Center for Children, Relationships, and Culture an der Universität von Maryland in College Park. **Marina Cords** ist Primatenforscherin; sie leitet die Abteilung für Ökologie, Evolution und Umweltbiologie an der Columbia University in New York.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

TEIL II: EPIGENETIK

DNA ist nicht alles

Innerhalb der Chromosomen, aber außerhalb des entzifferten genetischen Textes entdeckten Biologen eine weitere, doch viel flexiblere Ebene von Informationen, welche die Ausprägung von Merkmalen beeinflusst. Dieser Ebene widmet sich Teil II der Serie.

Von W. Wayt Gibbs

Humangenom auf einem Chip«: Unter dieser Schlagzeile berichtete die »New York Times« im vergangenen Oktober über drei biotechnologische Unternehmen, mit deren fingernagelgroßen Chips sich die Aktivität aller Gene in einer menschlichen Gewebeprobe erfassen lässt. Damit war eine der Erwartungen an das Human-Genomprojekt erfüllt: ein Werkzeug für die Forschung, um jene Abschnitte der Erbsubstanz DNA zu ermitteln, die in RNA abgeschrieben und in funktionsfähige Proteine übersetzt werden. Bei den RNA-Abschriften handelt es sich um DNA-ähnliche Moleküle.

Bei Veröffentlichung der »endgültigen Arbeitsfassung« der Genomsequenz im April 2003 wurde der 3-Milliarden-Buchstaben-Text aus den Basen A, T, G und C – Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin – mit vielfältigen Metaphern belegt: Bibel des menschlichen Erbes, Quellcode der Zellen, Bauplan des Lebens. In Wahrheit jedoch sind all diese Bezeichnungen irreführend.

Was an Informationen in den Chromosomen gespeichert und für die Entwicklung eines Organismus benötigt wird, ist kein kanonischer Text, der unverändert von einer Generation zur anderen weitergegeben wird. Eher könnte man das Genom, das Erbgut, als biochemische Maschinerie von ungeheurer Komplexität auffassen: Wie alle Maschinen ist sie dreidimensional aufgebaut und besteht aus definierten, dynamisch interagierenden Komponenten.

Proteincodierende Gene – solche, die Bauanweisungen für Eiweißmoleküle tragen – sind nur eine dieser Komponenten und eine eher kleine dazu, denn in menschlichen Zellen repräsentieren sie nur etwa zwei Prozent der gesamten DNA. Nach dem zentralen Dogma der Molekularbiologie galten die Proteingene allerdings für annähernd fünfzig Jahre als praktisch die alleinigen Bewahrer der genetischen Information, was auch die Interpretation des Genoms als Bauplan erklärt.

Kein evolutionärer Schrott

Bereits in den 1960er Jahren hatten jedoch genetische Experimente wichtige Informationselemente in anderen Bereichen der Chromosomen ans Licht gefördert, teils in »nichtcodierenden« Teilen der Sequenz, teils ganz außerhalb von ihr. Die Methoden der dann aufkommenden Gentechnik funktionierten jedoch am besten bei konventionellen Genen und Proteinen. Daher suchten die Wissenschaftler verständlicherweise am intensivsten dort weiter, wo die Sache am klarsten schien.

In den vergangenen Jahren haben sie aber auch die weniger augenfälligen Bereiche des Genoms genauer untersucht.



RANDY HARRIS PHOTOGRAPHY

Eineiige Zwillinge besitzen zwar identische DNA-Sequenzen. Entwickelt jedoch ein Zwilling eine komplexe Erkrankung mit genetischer Komponente, wie etwa Schizophrenie, erkrankt der zweite oft nicht daran. Dies liegt unter anderem daran, dass Merkmale offensichtlich auch flexibler, »epigenetisch«, vererbt werden, sprich: über Informationen, die zwar in den Chromosomen, nicht jedoch in der DNA selbst stecken.

Anlass waren unerklärliche Anomalien, die dem zentralen Dogma widersprachen:

▷ irgendwie erbliche Erkrankungen, die bei Angehörigen belasteter Familien aber völlig unvorhersehbar »durchschlagen« und selbst eineiige Zwillingspaare nicht gleichermaßen betreffen;

▷ nicht programmgemäß an- oder abgeschaltete Gene bei Krebs, die keinerlei Mutationen enthalten;

▷ geklonte, mit dem Spenderindividuum im Prinzip genetisch identische Embryonen, die oft bereits in der Gebärmutter absterben.

Wie sich zeigte, beeinflussen die zusätzlichen Informationsebenen – solche jenseits der Proteingene – in ganz erstaunlichem Umfang Vererbung, Entwicklungsvorgänge und Krankheitsverläufe. Welche Bedeutung und Funktion die erste Zusatzebene besitzt – die Vielzahl von so genannten Nur-RNA-Genen in den ausgedehnten nichtcodierenden Bereichen der DNA –, schilderte Teil I der Serie »Unsichtbares Genom« in der Februar-Ausgabe von Spektrum der Wissenschaft. Diese unkonventionellen Gene galten lange als evolutionärer Schrott, weil sie nicht in Proteine übersetzt werden. Sie erwiesen sich jedoch als keineswegs funktionslos; vielmehr liefern sie aktive RNAs, die in erheblichem Maße in das Verhalten gewöhnlicher Gene eingreifen. Fehlfunktionen dieser Nur-RNA-Gene können ernsten Schaden anrichten.

Hinzu kommt eine zweite Zusatzebene. Dieser dritte Bestandteil der genomischen Maschinerie, mindestens ebenso faszinierend wie die Nur-RNA-Gene und wahrscheinlich sogar noch wichtiger, sind die »epigenetischen« Informationen in den Proteinen und niedermolekularen Substanzen, welche die DNA umgeben oder dort gebunden sind (griechisch *epi* bedeutet auf, nach). So genannte epigenetische Marker können Gesundheit und Erscheinungsbild eines Organismus erheblich beeinflussen – einige werden sogar vererbt, obwohl sie die DNA-Sequenz selbst nicht verändern.

Einige der wichtigsten Mechanismen werden zwar gerade erst erforscht, doch nach allem, was man inzwischen weiß, scheint der epigenetische Part eine entscheidende Rolle für Entwicklung, Altern und Krebsentstehung zu spielen. Vermutlich mitschuldig sind »Epimutationen« zudem an Diabetes, Schizophrenie, manisch-depressiven Psychosen und weiteren komplexen Erkrankungen.

Daraus ergeben sich möglicherweise aber auch Chancen für neue Behandlungsansätze. Während Zellen ihre DNA mit hohem Aufwand vor Mutationen schützen, werden epigenetische Marker ständig neu gesetzt oder entfernt. Im Prinzip ließen sich daher Medikamente entwickeln, die ganze Gruppen marodierender oder stillgelegter Gene über epigenetische Effekte ab- beziehungsweise anschalten. Vielleicht könnten geeignete Pharmaka sogar einige der Schäden rückgängig machen, die bei Alterungsprozessen und im Vorfeld von Krebserkrankungen auftreten.

Üppiger Hintern höchst merkwürdig vererbt

Die Geschichte des Hammels »Solid Gold« zeigt, wie die Interaktion der drei genomischen Informationsebenen die klassischen Regeln der Genetik außer Kraft setzen kann. Das Tier wurde 1983 auf einer Ranch in Oklahoma geboren; seinen klingenden Namen erhielt es erst, als sein Hinterteil mit den fleischigen Keulen geradezu üppige Formen annahm. Der Farmer witterte eine umsatzträchtige Mutation und nahm den Goldhammel in die Zucht.

Wissenschaftler nannten das Merkmal *Callipyge*, griechisch für »schöner ▷

▷ Hintern« (siehe das Foto rechts). Solid Golds männliche Nachkommen mit großen Hinterbacken wurden mit normalen Mutterschafen gekreuzt. Die Hälfte der dann geborenen Lämmer, weibliche wie männliche, schlugen wieder ihrem Vater nach – was für einen klassisch dominanten Erbgang des Merkmals sprach. »Doch danach wurde die Sache vertrackter«, erinnert sich Michel Georges von der Universität Liège (Belgien), der als Berater hinzugezogen wurde.

Deckte nämlich ein normaler Hammel ein weibliches *Callipyge*-Schaf, entwickelte kein einziges der Lämmer die überentwickelten Hinterbacken ihrer Mutter – obwohl einige die Mutation nachweislich geerbt hatten. *Callipyge* hatte also anscheinend plötzlich von dominanter auf rezessive Vererbung umgeschaltet.

Väterlich oder mütterlich geprägt?

Im nächsten Schritt kreuzten die Genetiker normal gebaute Hammel, die aber Träger der Mutation waren, mit gewöhnlichen Mutterschafen. Zu ihrem Erstaunen entwickelte die Hälfte der Lämmer das typische kräftige Hinterquartier. Das Merkmal wurde demnach nur ausgeprägt, wenn es vom Vater kam.

»Völlig bizarr wurde die Sache«, erinnert sich Georges, wenn Nachkommen einer anderen Kreuzung zwei *Callipyge*-Allele trugen, das heißt, die gleiche Veranlagung sowohl von der väterlichen wie von der mütterlichen Seite geerbt hatten. Wäre *Callipyge* ein klassisches Gen, sollten solche Lämmer auf jeden Fall überdimensionierte Hinterbacken bekommen. Der gesamte Nachwuchs erwies sich jedoch als völlig normal gebaut (siehe Kasten auf S. 72/73). Wie kam dies alles zu Stande?

Zehn Jahre experimenteller Arbeit waren nötig, um das Rätsel zu lösen. Im Mai 2003 publizierten Georges und seine Mitarbeiterinnen die genomische »Rezeptur« für das Merkmal *Callipyge* samt Erbgang: ein konventionelles Proteingen, mindestens ein Nur-RNA-Gen plus zwei epigenetische Effekte. Das Tüpfelchen auf dem i ist schließlich eine so genannte Punktmutation – eine G-Base statt einer regulären A-Base an einer bestimmten Stelle »inmitten einer Genwüste, 30 000 Basen vom nächsten bekannten Gen entfernt«, erklärt Georges. Auf bisher ungeklärte Weise kontrolliert die DNA an diesem Fleck die Aktivität der beteiligten Protein- und Nur-RNA-Gene auf demselben Chromosom.

Der Austausch von A gegen G überaktiviert diese Gene, sodass zu viel von dem Protein oder der aktiven RNA in Muskelzellen produziert wird. Die überschießende Proteinsynthese vermag die prächtigen Hinterteile zu erklären, doch nicht das ungewöhnliche Vererbungsmuster. Wie auch andere Wissenschaftler führt Georges den Erbgang auf ein epigenetisches Phänomen zurück, das fachlich Imprinting oder genomische Prägung genannt wird. Anschaulicher spricht man auch von väterlicher oder mütterlicher Prägung.

Zumeist werden die von Mutter und Vater geerbten Versionen eines Gens beide gleichzeitig an- und abgeschaltet. Die genomische Prägung stört diese Balance und führt bei manchen Genen dazu, dass nur die väterliche Version aktiv ist; die mütterliche wird stumm geschaltet. Dies ist zum Beispiel der Fall bei dem Proteingen, das den *Callipyge*-Schafen übergroße Hinterschinken beschert. Daher sind Lämmer normal gebaut, wenn sie die G-Mutation vom Muttertier geerbt haben – denn die selektive Zensur durch die genomische Prägung kann von der Mutation nicht überspielt werden.

Bei dem mindestens einen *Callipyge*-Gen, das für aktive RNA codiert, funktioniert es umgekehrt: Die RNAs werden nur am Allel des mütterlicherseits geerbten Chromosoms erzeugt. Dieser zweite Effekt aus der epigenetischen Trickkiste erklärt teilweise, weshalb das Merkmal auch bei Tieren mit zwei *Callipyge*-Allelen nicht in Erscheinung tritt. Bei ihnen bringt die G-Mutation auf dem väterlichen Chromosom dessen Proteingen auf Hochtouren; gleichzeitig verstärkt aber die G-Mutation auf dem mütterlichen Chromosom die Synthese aktiver RNAs an den dortigen *Callipyge*-RNA-Genen – und diese überproduzierten RNAs blockieren irgendwie das verstärkte Wachstumssignal, das vom anderen Chromosom herrührt. Resultat: Die Tiere bleiben relativ schmächtig.

Tabula rasa im Embryo

Solche »Hyperdominanzeffekte« sind offenbar ziemlich selten. Die genomische Prägung hingegen ist ein recht häufiges Phänomen, besonders bei Blütenpflanzen. Randy L. Jirtle von der Duke-Universität in Durham (North Carolina) führt eine ständig aktualisierte Liste von menschlichen Genen im Internet, bei denen Imprinting-Effekte nachgewiesen sind; sie umfasst derzeit 75 Einträge. Viele weitere sind noch zu erwarten. So berichtete Maxwell P. Lee vom Nationalen Krebs-Institut in Bethesda (Maryland) im August 2003 über eine Analyse von 602 Genen bei sieben Personen. Bei der Hälfte der Gene war ein Allel deutlich aktiver; 170 davon arbeiteten sogar mehr als viermal stärker als ihr Gegenüber.

In den ersten Tagen nach der Empfängnis verschwinden in den embryonalen Zellen auf bisher unverstandene Weise praktisch alle Prägungsmarker. »Irgendwann zwischen diesem Zeitpunkt und der Mitte der Schwangerschaft jedoch wird der epigenetische Zustand der Chromosomen wiederhergestellt«, erklärt Emma Whitelaw von der Universität Sydney in Australien. Dabei komme es immer wieder zu Fehlern.

IN KÜRZE

▶ Die meisten Merkmale werden durch **Proteingene** vererbt. Eine weitere Informationsebene aber, die sich »epigenetisch« – in chemischen Markierungen **außerhalb der DNA-Sequenz** – verbirgt, wirkt sich gleichfalls dramatisch auf Gesundheit und Erscheinungsbild von Lebewesen aus.

▶ **Epigenetische Mechanismen** könnten erklären, warum manche Krankheiten Generationen überspringen und eineiige Zwillingspaare nicht gleichermaßen betreffen. Auch bei der **Entstehung von Krebs** spielen epigenetische Effekte offenbar eine Rolle.

▶ **Ein Genom** arbeitet eher wie eine komplexe Maschinerie mit verschiedenen ineinander greifenden Komponenten. Könnten epigenetische Mechanismen, als Teil dieser Maschinerie, **einer medikamentösen Therapie** leichter zugänglich sein als die DNA-Sequenz selbst?



SAM JACKSON, TEXAS TECH UNIVERSITY

Im Vergleich zu ihren normalen Geschwistern entwickeln so genannte *Callipyge*-Schafe – links außen ein Weibchen, Mitte rechts ein Männchen – besonders große fleischige Hinterteile. Das bizarre Vererbungsmuster dieses Merkmals ist nur durch die Interaktion dreier unterschiedlicher Informationsebenen des Genoms zu erklären.

Ein Beispiel: Das von der Mutter geerbte Gen für den insulinartigen Wachstumsfaktor 2 (kurz IGF2 nach der englischen Bezeichnung) wird beim Menschen normalerweise durch Prägung abgeschaltet. Bei etwa jedem zehnten Menschen fehlt dieser »Stempel« dort jedoch. Das scheint klinisch relevant zu sein. »Bei vierzig Prozent der Patienten mit nichterblichem Darmkrebs finden wir diesen Defekt«, bemerkt Carmen Sapienza von der Temple-Universität in Philadelphia (Pennsylvania). »Ein interessantes Ergebnis, wenn auch ein ursächlicher Zusammenhang bisher nicht belegt ist.« Studien mit einem Bluttest sollen derzeit klären, ob der Verlust des IGF2-Imprintings einen Weg bietet, das Darmkrebsrisiko vorherzusagen.

Epigenetische Variationen – so Whitelaw – könnten zudem erklären, »weshalb eineiige Zwillingspaare in ganz unterschiedlichem Maße von genetisch beeinflussten Krankheiten betroffen sind«. Tritt bei einem eineiigen Zwilling eine Krankheit mit genetischer Komponente auf, wie etwa Schizophrenie, manisch-depressive Psychose oder juveniler Diabetes, so ist der andere gewöhnlich nicht betroffen – obwohl er dieselben DNA-Sequenzen besitzt.

Fehlerhaftes Imprinting ist wohl auch bei gewissen relativ seltenen Erbkrankheiten im Spiel, wie dem Prader-Willi-, dem Angelmann-und dem Beckwith-Wiedemann-Syndrom. Im Jahr 2002 verglich eine Arbeitsgruppe um Rosanna Weksberg vom Kinder-Hospital in Toronto (Kanada) Zwillingspaare, bei denen nur einer von beiden an einem Beckwith-Wiedemann-Syndrom litt. Es geht mit Fehlbildungen des Gesichtsschädels und einem erhöhten Krebsrisiko in der Kindheit einher. Bei jedem betroffenen Zwilling hatte eine kritische Region von Chromosom 11 ihre Prägung verloren, beim gesunden Geschwister jedoch nicht.

»Bei der Krebsentstehung, in der Embryonalentwicklung und bei Geburtsfehlern spielt Imprinting zweifellos eine sehr wichtige Rolle«, konstatiert Francis Collins, Direktor des Nationalen Instituts für Human-Genomforschung in Bethesda. »Das Wie ist zwar noch nicht völlig verstanden, doch kommt der Methylierung der DNA dabei offenbar ganz besondere Bedeutung zu.«

Eine Methylgruppe besteht aus einem Kohlenstoffatom mit drei Wasserstoffatomen; dessen vierter »Bindungsarm« verankert sie an der zu methylierenden Substanz – in der DNA vorzugsweise an C-Basen, also an Cyto- ▷

GLOSSAR

▶ **Epigenetische Information** ist der reinen genetischen Information nachgeordnet – griechisch ***epi*** heißt auf, dazu, nach. Ursprünglich ging es dabei um Faktoren im Zellplasma, heute auch um Modifikationen »außen« an der DNA und den sie umhüllenden Proteinen.

▶ **DNA** und **RNA** sind die wissenschaftlich üblichen Kürzel für die englischen Bezeichnungen von Desoxyribonukleinsäure und Ribonukleinsäure.

▷ sin. Spezielle Enzyme, die Methylasen, übertragen Methylgruppen von Vitaminen wie Folsäure und B_{12} auf C-Basen im gesamten Genom, und zwar auf jeweils bestimmte.

Mit zunehmender Methylierung sinkt im Allgemeinen die Wahrscheinlichkeit, dass eine DNA-Sequenz abgelesen wird und so ihre Funktion ausüben kann. Ein durch Prägung völlig stummgeschaltetes Allel ist fast immer stark methyliert. Die Hauptaufgabe der chemischen Dekoration scheint jedoch weniger das Imprinting zu sein als vielmehr der Schutz des Genoms gegen parasitische DNA-Elemente, die so genannten Transposons.

Ein merkwürdig verdrehter Stammbaum

Wer erbt?

Vor zwanzig Jahren kam ein Hammel namens »Solid Gold« zur Welt. Er trug erstmals eine Mutation auf Chromosom 18, die seine Hinterbacken ungewöhnlich groß werden ließ (Hammel an der Spitze des Stammbaums).

Solid Gold vererbte dieses Merkmal an etwa die Hälfte seiner Nachkommen (grüne Linien nach unten) – typisch für einen dominanten Erbgang. In späteren Generationen zeigte sich jedoch, dass Schafe, die diese Mutation von ihrer Mutter erben, normal gebaut sind (blaue Linien nach unten), selbst wenn sie eine zweite mutierte Genkopie von ihrem Vater erhalten (violette Linien nach unten).

Epigenetische Effekte bedingen, dass ausschließlich die Schafe, die eine einzelne Kopie des Gens von ihrem Vater erben, übergroße Hinterteile entwickeln (rote und gelbe Linien).



Ein Maulkorb für Parasiten im Erbgut

»Wir stellen uns das Genom gern als reines unberührtes Erbe vor«, bemerkt Timothy Bestor von der Columbia-Universität in New York, »doch auch wenn uns der Gedanke nicht gefällt, unser Erbgut ist übersät mit parasitären Sequenzen.« Etwa 45 Prozent der menschlichen DNA besteht aus Genen oder Genfragmenten von Viren, die sich im Laufe der Evolution ins Genom eingenistet haben. Zum Glück sind praktisch alle diese parasitischen DNAs stark methyliert und damit inaktiviert.

Die enge Beziehung zwischen der Zahl der Methylgruppen und der Aktivität von Transposons konnte Jirtles Team im Sommer 2003 in einem verblüffenden Experiment mit so genannten Agouti-Mäusen belegen. Die Fellfarbe der Tiere steht unter Kontrolle eines parasitischen Genelements und variiert von gelblich zu schwarz. Eine Gruppe trächtiger Agouti-Mäuse erhielt das übliche Futter, eine andere Gruppe dagegen Spezialfutter, angereichert mit Vitamin B_{12}, Folsäure und anderen guten Methylquellen. Etwa sechzig Prozent ihrer Nachkommen bekamen im ersten Fall gelbes Fell, im zweiten dagegen braunes. Nähere Untersuchungen erbrachten, dass der Unterschied in der Fellfarbe ausschließlich auf die verstärkte Methylierung – und damit Inaktivierung – der Agouti-Transposons zurückzuführen war.

Doch was geschieht, wenn die »Methylabwehr« schwächelt? Schon vor einigen Jahren wurde hierzu ein Aufsehen erregendes Experiment durchgeführt. Die Wissenschaftler störten die Methylierung in embryonalen Stammzellen, indem sie das Gen für eines der nötigen Enzyme lahm legten. Das Ergebnis: Zahlreiche Transposons wurden aktiviert und die Mutationsrate der Zellen stieg auf das Zehnfache. Solche Experimente führen zu der faszinierenden Frage, ob epigenetische Veränderungen möglicherweise das genetische Chaos beschleunigen, ja vielleicht sogar in Gang setzen können, das mit Krebserkrankungen einhergeht.

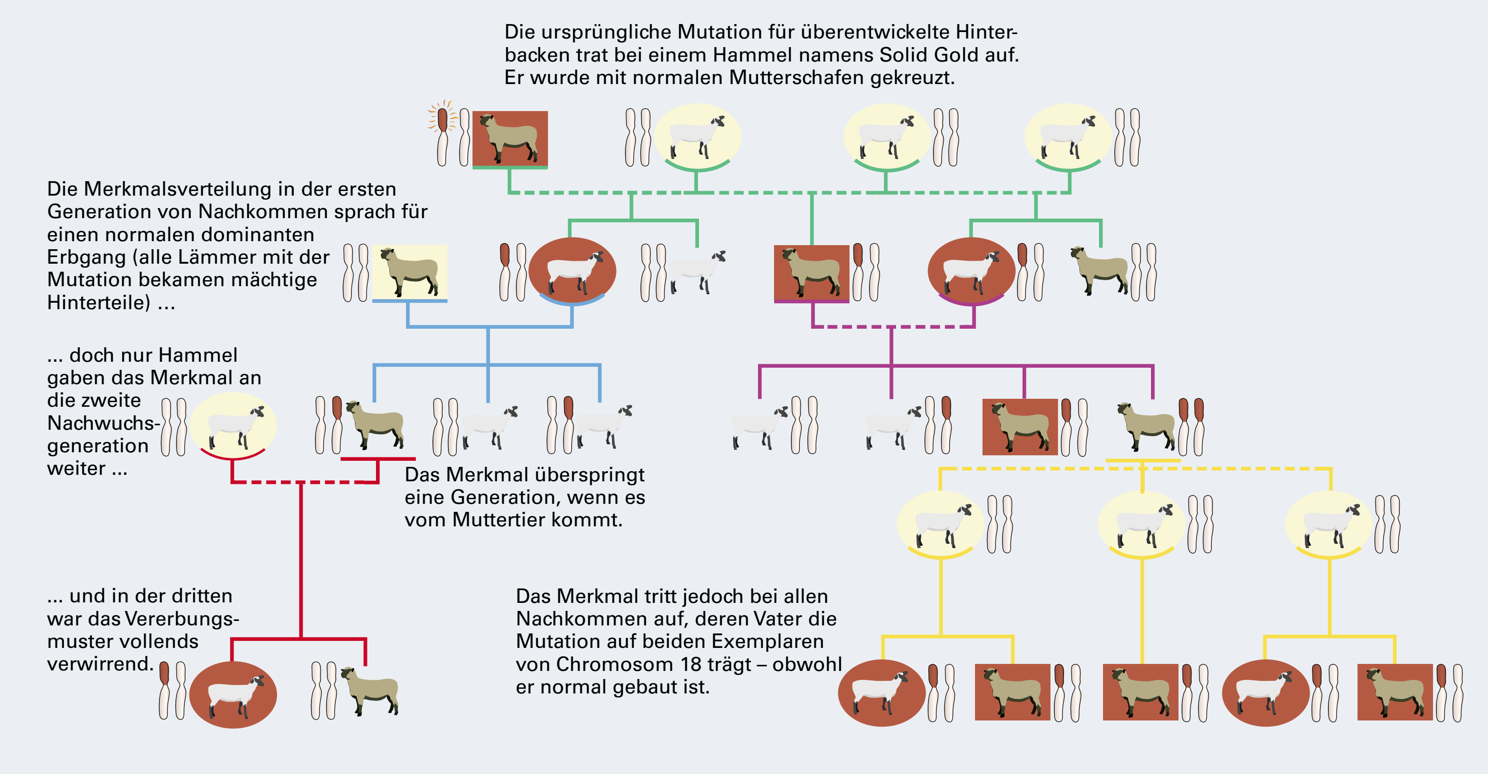
Tumorzellen tragen nämlich oft zu wenig Methylgruppen am Genom insgesamt, gleichzeitig jedoch zu viel an bestimmten Genen, die abnorme Zellen davon abhalten sollen, bösartig zu werden. »Bereits bei Darmpolypen [Wucherungen der Schleimhaut, aus denen Darmkrebs entstehen kann] finden wir eine Untermethylierung der gesamten genomischen DNA«, erklärt Stephen B. Baylin von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland). Und das noch bevor wichtige Anti-Tumorgene im Zuge der Krebsentstehung durch Mutationen inaktiviert werden.

Niemand kann bisher erklären, weshalb die DNA überhaupt so viele Methylgruppen verliert; ein entmethylierendes Enzym ist jedenfalls bislang nicht sicher nachgewiesen. Derart verarmte Chromosomen dürften jedoch während der Zellteilung eher zu Fehlfunktionen neigen und die Zelle damit einen Schritt weiter in Richtung Tumorentstehung treiben.

Gestützt wird diese Annahme durch Ergebnisse der Arbeitsgruppe um Rudolph Jaenisch vom Whitehead Institute am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge. Die Wissenschaftler erzeugten Mäuse mit einem angeborenen Mangel an einem Enzym, das Methylgruppen anhängt. Bei den meisten dieser Tiere wurde mindestens eines der unterbestückten Chromosomen instabil: Mutationen häuften sich rasch an, achtzig Prozent der betroffenen Mäuse starben binnen neun Monaten an Krebs.

Therapeutisches Großreinemachen?

Dass die Untermethylierung der DNA auch beim Menschen zur Entstehung von Tumoren führen könnte, ist bisher lediglich eine Hypothese. Es existiert zudem noch kein Medikament, das eine diffuse Untermethylierung des Genoms zu beheben vermag. Allerdings werden bereits Substanzen am Patienten geprüft, die das andere Problem – die zu starke Methylierung mancher Anti-Tumorgene – angehen sollen. Bis vor kurzem



NADIA STRASSER NACH: CAROLE CHARLIER UND MICHEL GEORGES, UNIVERSITÄT VON LIÈGE, BELGIEN

vertraten viele Wissenschaftler die Auffassung, ein Tumor könne nur entstehen, wenn Mutationen einige solcher unterdrückenden Gene außer Gefecht setzen. Bei vielen Tumorzellen sind deren DNA-Sequenzen jedoch völlig normal. Nicht Mutationen, sondern Fehler bei der Methylierung legen diese Gene lahm.

Medikamente wie das Lokalanästhetikum Procain, der Stimmungsaufheller Valproinsäure und das Chemotherapeutikum Decitabine reduzieren anscheinend die Methylierung der DNA, indem sie entweder Gruppen entfernen oder deren Anheftung im Erbgut neu gebildeter Zellen verhindern. Die Arbeitsgruppe um Jean-Pierre Issa vom M.-D.-Anderson-Krebszentrum an der Universität von Texas in Houston hat Decitabine bei Patienten mit Leukämie im fortgeschrittenen Stadium geprüft. Wie die meisten Krebsmedikamente hat die Substanz relativ starke Nebenwirkungen. »Doch wenn die Therapie anschlägt«, berichtet Issa, »bildet sich die Leukämie zurück: 99,9 Prozent der bösartigen Blutzellen verschwinden.« Dies war in einer Vergleichsstudie, die Issa im August 2003 publizierte, bei 8 von 130 Patienten der Fall, bei 22 weiteren bildete sich die Leukämie teilweise zurück.

»Derartige Mittel sind ein viel versprechender therapeutischer Ansatz«, kommentiert Sabine Maier von Epigenomics, einer Biotechnologiefirma in Berlin, die in Zusammenarbeit mit dem Pharmaunternehmen Roche in Basel Tumordiagnostika auf Basis der DNA-Methylierung entwickelt. »Ein Problem besteht freilich darin, dass all diese Substanzen das gesamte Genom entmethylieren. Dies dürfte Nebenwirkungen hervorrufen.«

Eine weitere Sorge ist, dass der Effekt nicht anhält: Nach einiger Zeit tauchen wieder Methylanhängsel auf und schalten die Tumorsuppressor-Gene erneut ab. »Die therapiebedingte Veränderung der Genexpression mag zwar nicht dauerhaft sein«, räumt Issa ein, »doch wenn sie bewirkt, dass die Tumorzelle vom Immunsystem als solche erkannt oder in die Apoptose – den programmierten Selbstmord – getrieben wird, dann erfüllt sie ihren Zweck; die Zelle ist tot.«

Dass nach der therapeutischen Säuberungsaktion an der DNA ein definiertes Methylierungsmuster wiederhergestellt wird, erinnert an die Reprogrammierung des Imprintings bei Embryonen kurz nach der Empfängnis. Wie finden die methylierenden Enzyme die jeweiligen Tumorsuppressor-Gene oder Allele, die sie erneut zu bestücken haben?

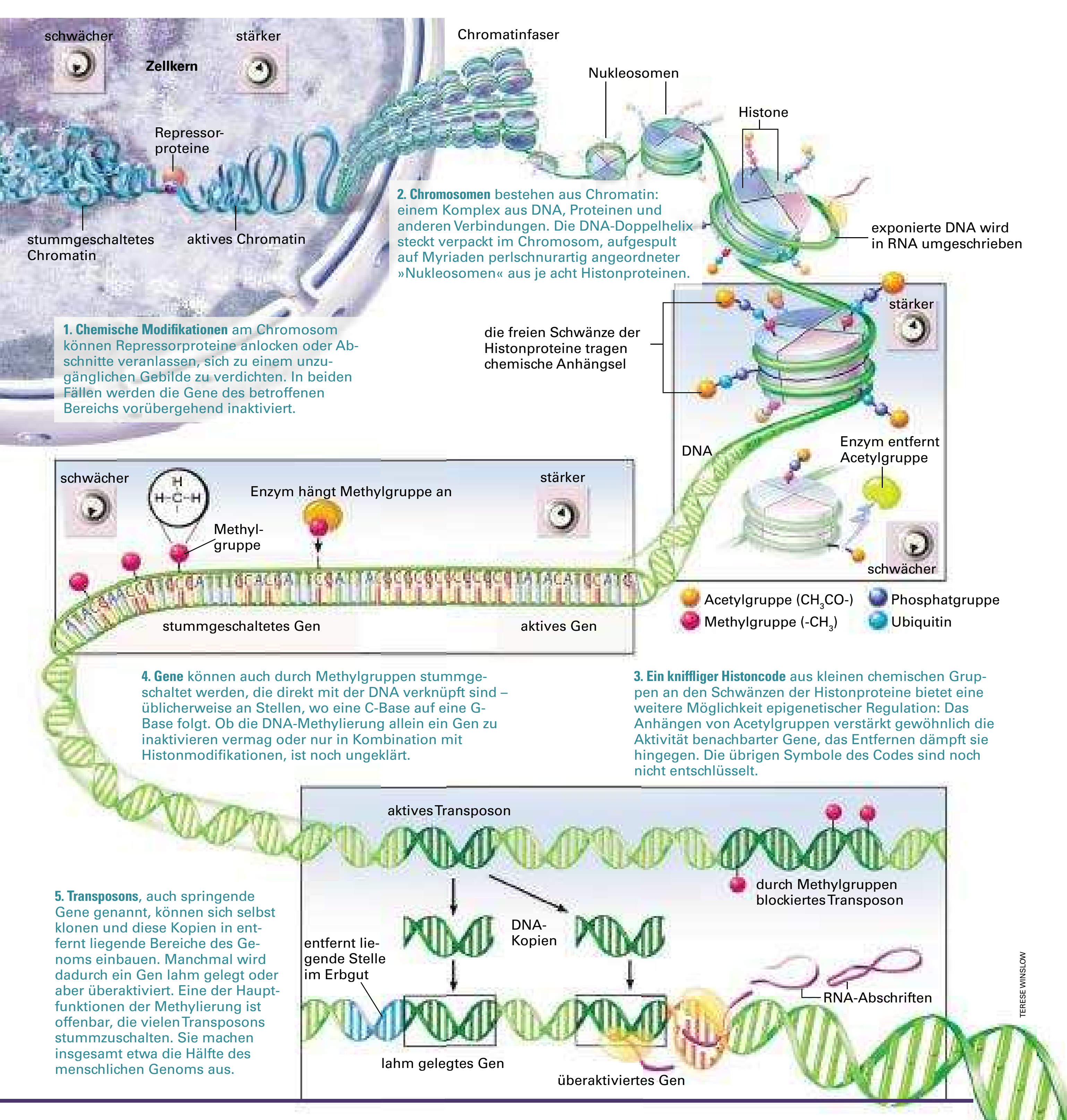
Soll das Klonen ausgereifter Tiere je Routine werden, muss diese Frage beantwortet werden. Derzeit läuft die epigenetische Reprogrammierung nämlich meistens völlig schief, wenn das Erbgut einer befruchteten Eizelle durch das einer Körperzelle aus einem reifen Organismus ersetzt wird. »Die Mehrzahl der geklonten Tiere zeigen abnorme Methylierungs- und Genexpressionsmuster«, erläutert David Wells, Klonexperte bei AgResearch in Hamilton (Neuseeland). Selbst wenn ihre DNA-Sequenzen normal sind, sterben neunzig Prozent der Tiere schon vor der Geburt, und die Hälfte der geborenen Jungtiere erreicht nicht das geschlechtsreife Alter. Die wenigen Überlebenden leiden oft an Fettsucht und Immunerkrankungen.

Wohin mit fast zwei Meter DNA?

Um bei geklonten Tieren, Tumorzellen und Erbkrankheiten die so häufigen Methylierungsfehler zu vermeiden oder zu beheben, müssen die Wissenschaftler den epigenetischen Code entschlüsseln. Dieser unterscheidet sich grundlegend vom genetischen Code der DNA. »Die Methylierung ist es nicht allein, die ein ▷

Wie Gene epigenetisch reguliert werden

Die DNA-Sequenz ist nicht die einzige Form verschlüsselter Information in einem Chromosom. Verschiedenartige epigenetische Phänomene fungieren wie Lautstärkeregler, verstärken oder schwächen die Wirkung von Genen. Epigenetische Informationen werden in einer Art Code verschlüsselt, bestehend aus kleinen chemischen Gruppen an der DNA selbst oder an den verpackenden Histonproteinen der Chromosomen. Eine der wichtigen Funktionen der epigenetischen Regulation ist das Stummschalten einer Vielzahl parasitischer genetischer Elemente im Genom, so genannter Transposons.



1. Chemische Modifikationen am Chromosom können Repressorproteine anlocken oder Abschnitte veranlassen, sich zu einem unzugänglichen Gebilde zu verdichten. In beiden Fällen werden die Gene des betroffenen Bereichs vorübergehend inaktiviert.

2. Chromosomen bestehen aus Chromatin: einem Komplex aus DNA, Proteinen und anderen Verbindungen. Die DNA-Doppelhelix steckt verpackt im Chromosom, aufgespult auf Myriaden perlschnurartig angeordneter »Nukleosomen« aus je acht Histonproteinen.

3. Ein kniffliger Histoncode aus kleinen chemischen Gruppen an den Schwänzen der Histonproteine bietet eine weitere Möglichkeit epigenetischer Regulation: Das Anhängen von Acetylgruppen verstärkt gewöhnlich die Aktivität benachbarter Gene, das Entfernen dämpft sie hingegen. Die übrigen Symbole des Codes sind noch nicht entschlüsselt.

4. Gene können auch durch Methylgruppen stummgeschaltet werden, die direkt mit der DNA verknüpft sind – üblicherweise an Stellen, wo eine C-Base auf eine G-Base folgt. Ob die DNA-Methylierung allein ein Gen zu inaktivieren vermag oder nur in Kombination mit Histonmodifikationen, ist noch ungeklärt.

5. Transposons, auch springende Gene genannt, können sich selbst klonen und diese Kopien in entfernt liegende Bereiche des Genoms einbauen. Manchmal wird dadurch ein Gen lahm gelegt oder aber überaktiviert. Eine der Hauptfunktionen der Methylierung ist offenbar, die vielen Transposons stummzuschalten. Sie machen insgesamt etwa die Hälfte des menschlichen Genoms aus.

▷ Gen stummschaltet«, sagt Baylin, »sie verankert diesen Zustand nur.« Die Methylasen erhalten ihre Anweisungen offenbar von anderer Stelle.

Aus der Nähe betrachtet ist ein Chromosom keineswegs ein wirres DNA-Knäuel, wie es manchmal gezeichnet wird. Auch handelt sich nicht um ein festes einzelnes Objekt, sondern um einen dynamischen Komplex aus DNA, Proteinen und anderen Substanzen. Die faserartige Gesamtstruktur namens Chromatin ist mehr als DNA mit Verpackung – das Gerüst kontrolliert auch den Zugang zu den Genen.

Chromatin enthält insgesamt doppelt so viel Protein wie DNA. Beim größten Teil der Eiweißstoffe handelt es sich um so genannte Histone, die Antwort der Natur auf die Frage: Wie bringt man als Zelle 1,8 Meter DNA im Zellkern unter? Nun: eben durch raffinierte Verpackung. Die DNA wickelt sich um Millionen von »Histonspulen«, die perlschnurartig angeordnet sind und sich zu Bündeln zusammenlagern (siehe obere Abbildung im Kasten links). Verschiedene Abschnitte eines Chromosoms können sich unabhängig voneinander verdichten oder auflockern. Damit werden ausgedehnte Bereiche jeweils dem Zugriff entzogen beziehungsweise für das Ablesen freigegeben.

Dekorative Verpackung als Protein-Code

Ein Paradebeispiel findet sich bei Frauen. Sie werden mit zwei X-Chromosomen geboren, Männer nur mit einem (neben ihrem Y-Chromosom). Ein weiblicher Embryo muss schon früh eines der beiden praktisch stumm schalten, um seine Zellen nicht der doppelten Dosis X-codierter Genprodukte auszusetzen. Dabei arbeiten zwei Komponenten der genomischen Maschinerie zusammen. Ein nichtcodierendes Gen namens Xist produziert eine aktive RNA, die sich in großen Mengen an das eine X-Chromosom anlagert. Das andere produziert hingegen eine so genannte Antisense-RNA als eigenes »Gegengift« gegen Xist-RNA.

Über das großenteils stillzulegende X-Chromosom breitet sich eine regelrechte Kettenreaktion aus: Große Teile seiner DNA bekommen Methyl-Etiketten, von den Enden seiner Histonproteine werden so genannte Acetylgruppen entfernt, und das Chromatin insgesamt verdichtet sich zu einer ziemlich unzugänglichen, mit RNA bedeckten Masse. Wenn der weibliche Organismus sich entwickelt und wächst, wird dieser Inaktivierungszustand bei praktisch allen Zellteilungen beibehalten.

Die Rolle der Histone in diesem Szenario ist noch nicht vollständig geklärt. Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Proteinschwänze, die aus den Histonspulen herausragen, auf verschiedenste Weise chemisch modifiziert sein können. Beim kompakten, inaktiven Chromatin fehlen im Allgemeinen die Acetylgruppen an den bevorzugten Punkten der Histonschwänze, die dafür oft an anderen Stellen methyliert sind. Auch Phosphatgruppen und das Miniprotein Ubiquitin kommen als Beiwerk an den Histonproteinen vor. All diese Etiketten tauchen an den unterschiedlichsten Stellen in vielfältigen Kombinationen auf. Der Histoncode dürfte daher nicht leicht zu entschlüsseln sein.

Im Gegensatz zum stabilen genetischen Code der DNA sind viele epigenetische Markierungen fortlaufenden Veränderungen unterworfen. Verdichtet sich ein Abschnitt des Chromatins, so kann sich die Stummschaltung entlang des Chromosoms so lange ausbreiten, bis sie auf ein Hindernis trifft. Xin Bi von der Universität Rochester hat vor kurzem Signalelemente identifiziert, die als Grenzsteine fungieren. Sie rekrutieren Enzyme, die Acetylgruppen an Histone anfügen. So wird sichergestellt, dass dort der aktive Zustand erhalten bleibt. Auch Lücken im Chromatin, wo DNA nackt vorliegt, können manchmal die Verdichtung stoppen, erklärt Bi. In anderen Regionen existieren keine definierten Grenzen, hier herrscht ein ständiges Hin und Her zwischen aktiven und stummen Regionen des Chromosoms.

Diese anhaltende Auseinandersetzung – so Issa vom M.D.-Zentrum – könnte erklären, weshalb Menschen mit zunehmendem Alter immer häufiger an Krebs erkranken. Möglicherweise bröckeln die Barrieren, die hochverdichtete, methylierte und damit inaktive Regionen von aktivem Chromatin trennen, wenn die Zellen sich öfter geteilt haben und altern.

Struktur und Funktion der nebulösen Anteile des Genoms sind noch immer erst schemenhaft erkennbar. »Eines ist jedoch klar«, sagt der Entwicklungsgenetiker Sapienza, »das Human-Genomprojekt war nur der Anfang. Als Nächstes brauchen wir eine ähnlich umfassende Beschreibung der epigenetischen Landschaft.« Im Oktober 2003 starteten Epigenomics und das Sanger-Institut des Wellcome Trust in Großbritannien das auf fünf Jahre angelegte Human-Epigenomprojekt, um sämtliche Methylierungsstellen der menschlichen DNA zu kartieren. Das Konsortium gab zudem bekannt, es habe eine vollständige Karte der über 100 000 Methylierungsstellen des Haupt-Histokompatibilitäts-Komplexes erstellt. Diese Genregion auf Chromosom 6 – sie enthält unter anderem Bauanweisungen für wichtige Moleküle immunologischer Erkennung – steht mit vielen Erkrankungen in Zusammenhang.

Ungeahnte Möglichkeiten zur genetischen Manipulation

Das neue Konzept der genomischen Maschinerie lässt die Forscher mit neuer Energie zu Werke gehen, auch weil es ungeahnte Möglichkeiten der genetischen Manipulation eröffnet. Die etwa 30 000 menschlichen Proteingene, so wichtig sie sein mögen, verkörpern nicht das alleinige Handbuch einer Zelle. Was zählt, sind auch nichtcodierende Sequenzen, chemische Modifikationen der DNA und der Histone sowie die Struktur des Chromatins. Und alles ist flexibel manipulierbar. »Wir müssen blind gewesen sein, dieses Universum epigenetischer Phänomene zu übersehen«, gesteht Bestor, »es zu erforschen ist überaus spannend.« ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



W. Wayt Gibbs ist Redakteur bei Scientific American.

Epi-Mutationen – ein neuer Ansatz. Von Stefanie Reinberger in: Spektrum der Wissenschaft, Spezial Krebsmedizin II, S. 20, 2003

The epigenome: molecular hide and seek. Von Stephan Beck und Alexander Olek (Hg.). Wiley, 2003

The Callipyge locus: evidence for the interaction of reciprocally imprinted genes. Von Michael Georges et al. in: Trends in Genetics, Bd. 19, Nr. 5, S. 248, Mai 2003

Controlling the double helix. Von Gary Felsenfeld und Mark Groudinein in: Nature, Bd. 421, S. 448, 23. Januar 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Als wär's zum Greifen nah

Bildschirme sind flach, die Welt aber ist räumlich. Das erschwert die Darstellung von Biomolekülen wie die Konstruktion von Maschinen und Gebäuden. Neuartige Monitore sollen den Konflikt lösen.

Von Bernhard Gerl

Das Telefon klingelt und ganz automatisch greifen Sie zum Hörer. Während der Anrufer erzählt, fällt Ihr Blick auf Bäume vor dem Fenster, um dann wieder zum Monitor des Laptops zu schweifen. Der Bildschirmschoner ist angesprungen und zeigt eine waldige Landschaft. Alltag für den Gesichtssinn. Doch dass Sie Animation und Realtität unterscheiden können und einen Telefonhörer ohne die Bewegung zu reflektieren zum Ohr führen, ist dem räumlichen Sehvermögen zu verdanken. Und gerade das versuchen Forscher in der Computergrafik mit ausgetüftelten Verfahren zu nutzen, um auch die Bilder einer eigentlich zweidimensionalen Mattscheibe wie ein Fenster in eine dreidimensionale Szenerie wirken zu lassen.

Die Beidäugigkeit des Menschen bildet die Basis räumlicher Wahrnehmung: Das linke Auge sieht einen Gegenstand aus einem geringfügig anderen Winkel als das rechte, das Gehirn verrechnet beide Bilder und ermittelt aus dem Querdisparation genannten Versatz die Entfernung zum Objekt. Wertvolle Informationen liefern auch die Akkommodation der Augen – auf welche Entfernung stellen die Linsen scharf? – und ihre Konvergenz – wie stark weicht die Stellung der Augen von der parallelen ab? Hinzu kommen Erfahrungswerte: Ein Objekt, das ein anderes verdeckt, muss sich davor befinden. Weiter entfernte Gegenstände erscheinen blasser und vor allem kleiner als solche direkt vor dem Betrachter. Parallele Linien scheinen deshalb zum Horizont hin zusammenzulaufen. Es gibt eine Vielzahl solcher Regeln, die Maler und Zeichner seit der Renaissance beachten, um ihren Werken räumliche Tiefe zu geben. Die Kunst der Computergrafik besteht unter anderem darin, solche Regeln in Algorithmen zu übersetzen. Doch so geschickt Künstler wie Ingenieure auch vorgehen – der Eindruck eines Gemäldes, eines Fotos oder einer Bildschirmdarstellung erreicht nie die Wahrnehmungsqualität einer realen Szene.

Fast zeitgleich mit der Erfindung der Fotografie beschäftigten sich in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts die Physiker Sir Charles Wheatstone (1802–1875) und Sir David Brewster (1781–1868) mit so genannten Stereoskopen. Die damals recht unhandlichen Vorrichtungen präsentierten den Augen Bilder, die jeweils mit einer gering anderen Perspektive gemalt oder aufgenommen worden waren. Auf diese Weise simulierten die Wissenschaftler die Querdisparation und vermittelten dem Betrachter einen plastischen Eindruck.



HEINRICH-HERTZ-INSTITUT

Wie ein Fenster in die Wirklichkeit zeigt der autostereoskopische LCD-Monitor eine räumliche Szene. Ein Trennraster aus einer Vielzahl schmaler, vertikal ausgerichteter Zylinderlinsen vor dem eigentlichen Flachbildschirm sorgt dafür, dass jedes Auge eine leicht andere Perspektive wahrnimmt, sodass eine Tiefenwirkung entstehen kann.

Tatsächlich basieren die meisten Techniken zur 3-D-Darstellung auch heute noch auf diesem grundlegenden Ansatz. Sehr bekannt sind Bücher aus der Reihe »Das magische Auge«. In scheinbar wirren Mustern tauchen dreidimensionale Objekte auf, wenn der Betrachter es schafft, durch die Seite hindurch in die Ferne zu fokussieren. Solche fachlich Autostereogramm genannten Bilder präsentieren die Information über ein räumliches Objekt in Mustern, die sich horizontal wiederholen: Linkes und rechtes Auge sehen bei entsprechender Einstellung jeweils Teile der Szene, die wiederum den der Querdisparation entsprechenden Abstand haben (Spektrum der Wissenschaft 1/1995, S. 10).

Der unfokussierte Blick durch die Papierebene hindurch ist aber recht anstrengend, sicher keine Methode, um Monitore 3-D-fähig zu machen. Weniger Mühe hingegen bereiten Techniken, die auf der Eigenheit des Sehsinns aufbauen, hellere Gegenstände schneller wahrzunehmen als dunklere. Wird ein Auge mit einem Filter kurzfristig abgedunkelt, sieht es eine Szene etwas später. Fährt nun eine »Kamera« um ein Objekt herum oder wird dieses bewegt, verarbei-


HEINRICH-HERTZ-INSTITUT

▲ Um einen Entwurf auf sich wirken zu lassen, würden Architekten wie auch Bauforscher 3-D-Displays einsetzen. Neueste 3-D-Technologien ermöglichen es, computergenerierte Entwürfe für direkte Interaktionen in Greifnähe des Betrachters darzustellen. Ein Kraftrückkopplungssystem (nicht dargestellt) erzeugt natürliche Tastempfindungen beim Berühren des 3-D-Luftbildes.

tet jedes Auge zu einer bestimmten Zeit einen etwas anderen Blickwinkel. Der Tiefeneindruck setzt bei dieser Technik also stets eine Bewegung voraus.

Bekannter, da weniger aufwändig, ist wohl die Rot-Grün-Brille, die schon 1954 den »Schrecken vom Amazonas« in den Kinos noch gruseliger machte. Die linke Folie der Brille filtert alle roten Farben, die rechte alles Grün aus einem Motiv heraus. Zeigt ein Bildschirm also – entsprechende Aufnahme einer Szene vorausgesetzt – gleichzeitig dem rechten Auge ein rotes Bild und dem linken ein grünes, wieder mit jeweils entsprechenden Ansichten, so erscheint das Gesamtbild dreidimensional. Freilich: Farbecht ist das Ergebnis in der Regel nicht.

Keine Helmpflicht für virtuelle Welten

Eine Alternative bietet der Bildschirm in Kombination mit einer so genannten Shutterbrille. Mit einer Frequenz von 120 Hertz präsentiert der Monitor abwechselnd das Bild für das rechte und das linke Auge, die Brille verdunkelt dabei synchron das jeweils andere, sodass jedes Auge sechzig Bilder pro Sekunde sieht. Das Gehirn erkennt diese schnelle Umschaltung nicht und rekonstruiert eine räumlich wirkende Ansicht. Leider leuchten die Bildpunkte des Monitors relativ lange nach, sodass jedes Auge dann doch etwas von dem jeweils anderen Bild sieht. Je verschiedener die Perspektiven sind, das heißt je größer die räumliche Tiefe ist, desto mehr stört dieser Effekt.

Schon die Shutterbrillen sind nicht unbedingt bequem, die so genannten »Head Mounted Displays« verlangen vom Benutzer sogar das Tragen eines speziellen Helms. Dafür aber erzeugen sie sehr plastische Bilder. Im einfachsten Fall enthält der Helm zwei kleine Bildschirme, die aus entsprechend unterschiedlichen Winkeln aufgenommene Filme oder Bilder zeigen; hinzu kommen noch einige Linsen, denn die Augen können auf fünf Zentimeter Entfernung nicht scharf stellen. Anspruchsvoller sind Systeme, die ein Bild als Raster roter, grüner und blauer Farbpunkte zeilenweise direkt auf die jeweilige Netzhaut projizieren. Dieses Verfahren ermöglicht es, weit mehr Farben darzustellen als mit anderen Displays, doch der Schutz der Augen erfordert eine sehr aufwendige Optik und Kontrolle der Helligkeit.

Freilich: Eine eher unförmige Brille oder gar einen Helm zu tragen ist nicht jedermanns Sache, und dementsprechend will sich der Markterfolg solcher Systeme nicht recht einstellen. Wer nicht komplett in die virtuelle Welt eintauchen will, sondern das angesprochene Fenster in eine räumliche Welt sucht, ist mit autostereoskopischen, das heißt brillenlosen 3-D-LCD-Monitoren besser bedient. Sie bestehen aus einem Flüssigkristallbildschirm *(liquid crystal display)*, wie er von Laptops und Flachbildschirmen bekannt ist, und eine vorgesetzte Platte aus stabförmigen Zylinderlinsen oder Prismen. Das Raster der Bildpunkte (Pixel) ist bei dieser Technik anders organisiert: Benachbarten Spalten gehören zwei Ansichten einer Szene. Die Vorsatzoptik lenkt das Licht zum jeweils richtigen Auge und ein räumlicher Eindruck entsteht.

Doch bewegt sich der Betrachter, schwindet der Tiefeneindruck, im schlimmsten Fall werden die Bilder sogar vertauscht, sodass also das linke Auge die für das rechte gedachte Szene sieht und umgekehrt. Der kleine Berg im Hinter- ▷

▷ grund erscheint dann näher als der im Vordergrund stehende große Baum. Nachführsysteme sollen deshalb bei Kopfbewegung das Linsenraster seitlich verschieben oder die Verteilung der Perspektiven auf die Pixelspalten weiterschalten. Das erfordert aber zusätzliche Erfassungssysteme für die Kopfposition des Betrachters. Ein derart ausgestatteter Monitor kostet zurzeit etwa 5000 bis 10000 Euro, kommt also für den Heimanwender kaum in Frage. Bioingenieure, Konstrukteure und Architekten gehören vielmehr zur Zielgruppe.

Einige 3-D-Displays lassen sich auch von der drei- auf die zweidimensionale Darstellung umschalten. Zum Beispiel benötigt ein Architekt die dritte Dimension nur gelegentlich, etwa um Entwürfe auf sich wirken zu lassen. Will er sie einem Kunden vorstellen, ist es natürlich ungünstig, dass zur Korrektur von Bewegungen nur die Kopfposition einer einzigen Person verfolgt werden kann. Einen Ausweg bieten Prototypen, die mehr als zwei Ansichten eines Motivs bereithalten. Bewegt sich ein Betrachter, kommt er in einen anderen Bereich, so wie man in der Realität auch bei einem Schritt zur Seite plötzlich vorher verdeckte Teile eines Gegenstandes bemerkt. Freilich reduziert diese Technik die Auflösung eines Bildes in der Horizontalen.

Wann kommt das Holo-Zän?

Hologramme böten die optimale 3-D-Projektion

Für Star-Wars-Fans gehören Hologramme seit langem zum kosmischen Alltag, doch deren Umsetzung in den irdischen Alltag ist noch weit vom 3-D-Fernsehen entfernt. Die Holografie wurde von dem britischen Physiker Dennis Gabor (1900–1979) entwickelt; er erhielt dafür 1971 den Nobelpreis. Ein Laser leuchtet ein Motiv aus. Das reflektierte Licht wird mit einem Referenzstrahl gleicher Wellenlänge überlagert. Auf Grund der Einflüsse des beleuchteten Objekts entstehen Gangunterschiede zwischen den Wellen, sodass ein Interferenzmuster resultiert. Dessen Intensitätsverteilung wird in einer fotografischen Platte sozusagen eingefroren. Beleuchtet man sie mit einem Laser gleicher Wellenlänge, wird das abgebildete Objekt rekonstruiert – es entsteht ein dreidimensionales Bild. Das Verfahren hat weite Verbreitung gefunden, etwa in der Messtechnik und optischen Datenverarbeitung.

Am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge versuchten Wissenschaftler, eine Elektroholografie genannte Variante zu entwickeln. Computer berechnen aus Objektdaten ein virtuelles Interferenzmuster und »akustooptische Modulatoren« steuern das Licht von je einem roten, grünen und blauen rekonstruierenden Laser. Diese Bauelemente bestehen aus transparentem Kristall, dessen Brechungsindex durch Ultraschallschwingungen verändert werden kann.

In einer holografischen Aufnahme befinden sich aber auf nur einem Quadratmillimeter etwa zehn Millionen Informationen, auf einer Aufnahme von der Größe eines Dias demnach schon zehn Milliarden. Diese Informationsdichte in einem elektroholografischen Display in Echtzeit zu verarbeiten, überschreitet die Leistungsfähigkeit heutiger Computer- und Displaytechnik bei weitem. Deshalb verzichteten die Wissenschaftler des MIT auf die räumliche Tiefe in vertikaler Richtung und strichen bei den Berechnungen alle Terme, die sich aus Überlagerungen von zwei oder mehreren vom Objekt reflektierten Wellen ergaben. Für die Darstellung und Berechnung benutzten sie also nur noch die Interferenzen des Referenzstrahls mit der Wellenfront des unmittelbar vom Objekt reflektierten Lichts.

Doch auch damit vermochten sie vor wenigen Jahren nur ein Display für 36 Megabyte zu realisieren; das Bild hatte zehn Zentimeter Kantenlänge. Noch größere Bilder sind aber zurzeit kaum möglich, da mit der Größe auch die erforderlichen Laserintensitäten erhöht werden müssen. Hier hat man ebenfalls die Grenzen des Möglichen erreicht.

Hologramm nach Star-Wars-Art: Geisterhaft und doch körperlich wirkend schwebt das Abbild im Raum.

CINETEXT

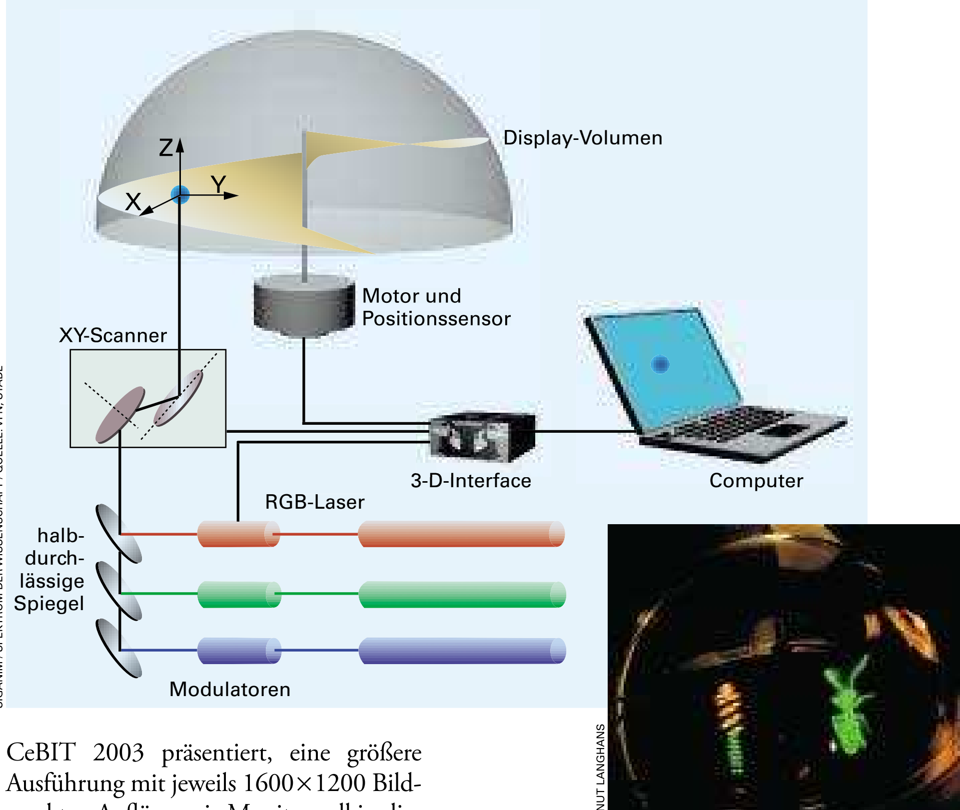
Im Jahr 2002 präsentierte die Fraunhofer-Patentstelle für die Deutsche Forschung ein autostereoskopisches 3-D-Display, das ohne Linsenplatte auskommt und zudem eine hohe Auflösung hat. Das Verfahren wurde an der Universität Darmstadt entwickelt und soll von der Patentstelle in die Industrie vermittelt werden. Der Trick besteht darin, die jeweils vom Auge wahrgenommenen Bildstreifen als sehr schnelle Folge auf dem Schirm darzustellen.

Die Entwickler vergleichen dies gern mit dem Schlitzverschluss einer Spiegelreflexkamera: Bei geöffneter Rückwand nimmt der Betrachter einen Streifen wahr, der über die Szene rast. Jedes Auge sieht wieder eine perspektivisch leicht versetzte Ansicht. Die Rolle des Verschlusses übernimmt eine Platte, in die Flüssigkristallstreifen integriert sind, die je nach Ansteuerung Licht durchlassen oder sperren. Das Verfahren könnte beliebig viele Betrachter beziehungsweise Positionen zulassen, wenn nur die Teilansichten schnell genug weitergeschaltet werden. Doch leider gibt es zurzeit nur wenige Monitore, die dazu in der Lage wären, da die einzelnen Bildpunkte zu lange nachleuchten.

Nicht jeder 3-D-Monitor ist schon ergonomisch

Leider wird beim Dauereinsatz das Gehirn ungewohnt beansprucht, denn die Augen fokussieren auf den Bildschirm, während sie einen scheinbar weit entfernt liegenden Gegenstand betrachten. Der Effekt einer festen, auf die Bildschirmentfernung »eingefrorenen« Akkommodation ist besonders störend, wenn der Anwender das virtuelle Objekt – vermittelt durch eine Kraftrückkopplung – anfassen oder mit einem realen Werkzeug bearbeiten möchte.

Für solche Mixed-Reality-Anwendungen hat das Berliner Heinrich-Hertz-Institut ein autostereoskopisches Projektionsdisplay entwickelt. Die beiden computergenerierten Ansichten eines 3-D-Objekts werden dabei auf zwei separaten, sehr hoch auflösenden LCD-Displays wiedergegeben. Ein spezielles optisches System projiziert beide Ansichten auf eine Ebene in 25 Zentimeter Entfernung vor dem Bildschirm auf eine Filterscheibe. Die Augen akkommodieren also auf das in Greifnähe liegende Luftbild. Der Betrachter kann es »berühren«, ohne gegen einen Bildschirm zu stoßen (siehe Bild S. 77). Ein kleinerer Prototyp wurde auf der CeBIT 2003 präsentiert, eine größere Ausführung mit jeweils 1600×1200 Bildpunkten Auflösung je Monitor soll in diesem Jahr potenzielle Kooperationspartner ansprechen.



3-D-Beamer: Eine rotierende, dabei wendelförmige Fläche wirkt wie ein rundum einsehbarer Monitor. Doch die bisherigen Ergebnisse (Foto) sind von einem 3-D-Fernseher noch weit entfernt.

Ein realer Gegenstand hat stets mehr als eine Seite. Für einige Anwendungen wie die Darstellung von Biomolekülen oder des Flugverkehrs in einem bestimmten Luftraum wären »Monitore« nützlich, die ein Objekt nicht nur scheinbar vor dem Betrachter drehen, sondern um die ein Forscher oder Fluglotse wirklich herumgehen könnte.

Rüdiger Hartwig, damals Physiker an der Universität Heidelberg, hatte schon 1983 die Idee, eine rotierende Helix aus Plexiglas zu bauen, die drei farbigen Lasern als Projektionsfläche dient. Bei 1200 Umdrehungen pro Minute sieht man die Helix selbst nicht mehr, nur noch die auf aufleuchtenden Punkte. Der Verein zur Förderung des naturwissenschaftlichen Nachwuchses in Stade griff diese Idee auf und baute zwei Jahre später einen Prototyp. Im Laufe der Jahre ersetzten die Mitarbeiter dieser Gruppe die Helix durch lichtdurchlässige Glas-, Kunststoff- oder Kristallwürfel, die mit seltenen Erden dotiert sind.

Bestrahlt man diese Elemente gleichzeitig oder kurz nacheinander mit zwei sich kreuzenden Infrarot-Laserstrahlen, so werden sie angeregt und senden je nach Element Licht einer bestimmten Farbe aus. Auch dabei entsteht ein räumliches Bild. Doch die Kristallwürfel sind teuer und die Ansteuerung der Laser sehr aufwändig, muss doch jeder Punkt im Darstellungsvolumen beleuchtet werden.

Ob 3-D innerhalb des kommenden Jahrzehnts schon das private Fernsehen verändern wird, scheint angesichts der technischen Probleme fraglich. Doch wenn, dann lockt ein enormer Markt. Die Standardisierungsgruppe für digitale Filme im MPEG4-Format und das aus acht europäischen Firmen bestehende Attest-Konsortium (Advanced Three-dimensional Television System Technologies) bereiten deshalb schon den Weg und initiieren Projekte und Normen. Sicher ist derzeit wohl nur eines: Ein 3-D-Fernsehsystem für den Massenmarkt muss bezahlbar sein, aber auch kompatibel zur bisherigen 2-D-Darstellung – wie sonst als durch den Rückgriff in die Filmarchive sollten öffentlich-rechtliche wie private Sendeanstalten ihre Programme füllen. ◁

AUTOR



Der Physiker **Bernhard Gerl** ist freier Fachautor in Regensburg.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

POLYDIMENSIONS GMBH

Gallenblase im Simulator

Ein Computer vermittelt angehenden Chirurgen, wie sich eine Operation anfühlt.

Von Tim Schröder

Bevor ein Arzt zum ersten Mal operieren darf, muss er üben, üben, üben. In Tierorganen präpariert er Blutgefäße aus dem umgebenden Gewebe heraus und legt Nervenfasern frei. Seit kurzer Zeit gibt es zudem Operationssimulatoren, an denen sich verschiedene Eingriffe erproben lassen. Der Schritt zur wirklichen Operation ist aber sehr groß, denn das Köperinnere eines virtuellen Patienten entspricht meist nur grob dem eines realen. So erscheinen Gewebe in den Simulatoren als weit gehend unstrukturierte Flächen, Organe als mehr oder weniger stilisierte Gebilde.

Ein junges Unternehmen aus dem hessischen Bickenbach will das ändern. In Kooperation mit einer amerikanischen Firma hat die PolyDimensions GmbH einen Operationssimulator entwickelt, der virtuelle Organe und medizinische Eingriffe fotorealistisch darstellt. Ihr »LAP Mentor« wirkt auf den ersten Blick unspektakulär: zwei Metallgehäuse auf einem Rollwagen, darauf ein Flachbildschirm. Doch der Apparat hat es in sich. Der kleinere Behälter ist dem Rumpf eines Patienten nachempfunden. An ihm übt der angehende Arzt einen minimalinvasiven Eingriff, auch als Schlüssellochoperation bekannt. Ein kleiner Schnitt dient als Zugang für die Endoskope, in denen Lichtleiter für Beleuchtung und Videokamera ebenso integriert sind wie Führungen für miniaturisierte chirurgische Instrumente (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/2002, S. 88). Dementsprechend weist auch der metallene »Patient« Öffnungen auf, aus denen dünne Instrumentengriffe ragen, die denen bei einer Operation entsprechen. Im Inneren des Simulators ist jeder Griff an zwei bis drei kleinen Roboterarmen verankert. Diese erzeugen, abgestimmt auf den simulierten Gewebetyp und die Handbewegungen des Übenden, eine Gegenkraft – so erfährt dieser einen realistisch wirkenden Widerstand (siehe Kasten).

Das Besondere des Systems ist aber nicht allein die Kraftrückkopplung, sondern der Realitätsgrad der visuellen Darstellung. Organe werden mit charakteristischen Rundungen, Einbuchtungen und ihren Blutgefäßen gezeigt; selbst feine Nuancen wie Rötungen und Entzündungen sind zu sehen. Durchtrennt der Anwender eine virtuelle Ader, dann fließt Blut. Die Datenbasis für diesen fotorealistischen digitalen Körper bilden Computer- und Magnetresonanztomografien von Menschen. Um Organe zu rekonstruieren, wurden sie in dreidimensionale Gitternetze umgewandelt. Tausende winziger Dreiecke liefern beispielsweise die authentischen Rundungen einer Gallenblase – deren Entfernung bildet das erste realisierte Operationsszenario.

Blut als Partikelstrom

Digitale Fotografien des Körperinneren, aufgenommen bei Operationen, werden auf diese Gitter abgebildet, um eine naturgetreue Optik zu erzeugen. »Zwar existieren bereits digitale Organmodelle, die aus Tomografiedaten generiert werden«, räumt Alexandra Schaeffer, Firmengründerin und Geschäftsführerin von PolyDimensions, ein. »Die haben aber nur wenig mit der Anatomie eines Patienten während einer OP gemeinsam.« So zeigten sie letztlich nur die Umrisse der großen Organe, zudem nur in der Position, die die Organe während der CT- oder MR-Aufnahme haben. Der LAP-Mentor hingegen stellt weit gehend dar, was ein Operateur auch wirklich sehen würde.

Das amerikanische Partnerunternehmen Simbionix stellt die Hardware zur Verfügung und darüber hinaus die Software, die Bilddaten und Kraftrückkopp-

Auf einem Monitor verfolgt der Chirurg die Simulation des minimalinvasiven Eingriffs. Die grüne Box repräsentiert den Körper des Patienten mit den eingeführten Instrumenten.





ALLE ABBILDUNGEN: POLYDIMENSIONS GMBH

Mehr Gefühl dank Kraftrückkopplung

Soll auch der Tastsinn in virtuellen Welten angesprochen werden, muss eine Kraftrückkopplung den Bewegungen der Hände und Finger Widerstand entgegensetzen. Auf diese Weise imitiert das System die mechanischen und haptischen Eigenschaften der simulierten Objekte.

Dazu dienen zum Beispiel Roboterarme, deren einzelne mechanische Elemente, dem Ober- und Unterarm sowie der Hand eines Menschen entsprechend, hintereinander geschaltet sind. In Operationssimulatoren lassen sich so chirurgische Instrumente bewegen und ihre Positionen gezielt einstellen. Der Nachteil einer solchen »seriellen Kinematik«: Das Werkzeug an der Roboterspitze muss relativ klein sein, da jeder Abschnitt das Gewicht des nachfolgenden trägt. Dementsprechend müssen die Elektromotoren eine relativ große Leistung aufbringen, obwohl sie an der Spitze der Einheit nur eine verhältnismäßig geringe Masse bewegen.

Die PolyDimensions GmbH hat deshalb zusammen mit Forschern der Technischen Universität Darmstadt eine parallele Kinematik entwickelt, die leistungsfähiger ist. Sechs kolbenartige Elektromotoren ziehen oder drücken am Operationsinstrument, bis der Griff eine gewünschte Position erreicht hat.

Durch eine fein abgestimmte Choreografie der verschiedenen Bauteile lässt sich die Bewegung der Instrumente nach Vorgaben des Rechners beeinflussen, etwa um einen Widerstand zu simulieren. Doch auch die parallele Variante hat einen Nachteil. Die Elektromotoren müssen in einem kastenförmigen Gestell aufgehängt werden und das benötigt mehr Platz als die Instrumente selbst. Bevor die parallele Kinematik zum Einsatz kommen kann, soll sie zunächst weiter miniaturisiert werden – unter anderem durch noch kleinere und leistungsstärkere Motoren.



Realistisches Kunstblut: Eine Arterie ist verletzt worden.

lungsmechanik in Echtzeit verbindet. Die Motoren bestimmen nämlich über ihre Position auch millimetergenau die Bewegungsrichtung eines simulierten Instruments. Der Computer ermittelt dann das dazu passende Bild, die richtige Ausrichtung des Operationsinstruments und die exakte Blickrichtung. Bis zu 25-mal pro Sekunde wird ein neues Bild berechnet. Neben den Dreiecken, die die Gallenblase darstellen, kommen noch etwa 60 000 hinzu, die die Umgebung des Organs zeigen – die Körperhöhle, die benachbarte Leber. In Sekundenbruchteilen wird das komplette Gitter berechnet und mit den passenden Gewebemustern versehen, sodass alle Veränderungen im virtuellen Körper in Echtzeit ablaufen.

Derartige Berechnungen gehören zwar längst zur Ausstattung von Computerspielen. Dort sind aber beispielsweise Licht- und Schatteneffekte den Strukturen fest zugeordnet, was unrealistisch und statisch wirkt. Will man aber ein echtes Organ vorgaukeln, das sich im Schein der Operationslampen dreht und wendet, müssen Lichtreflexe und Schatten immer neu ermittelt werden. Entsprechende Rechenvorschriften haben die Bickenbacher Entwickler direkt in den Grafikchip programmiert.

Komplexe Algorithmen berechnen selbst Blutungen oder Rauchentwicklungen beim Verschmelzen von Gewebe. »Für ähnliche Effekte in Hollywoodfilmen dürfen ganze Computerfarmen wochenlang an wenige Minuten langen Animationen rechnen«, erläutert Albert Schaeffer, ebenfalls Geschäftsführer. »Unsere Software hingegen muss alle Bilder inklusive der dazugehörigen Kraftrückkopplung in wenigen Millisekunden bereitstellen.« Den Blutfluss etwa simuliert der Computer als Strom von Partikeln. Spezielle Algorithmen verleihen den kleinen Teilchen gemeinsame physikalische Eigenschaften, lassen sie beispielsweise in eine bestimmte Richtung strömen, eine vergleichsweise junge Technik der grafischen Datenverarbeitung.

Das täuschend echte Bindegewebe wurde mit einem neuen Verfahren simuliert und besteht bei näherer Betrachtung aus einem Muster feiner paralleler und sich kreuzender Linien. Denn ein Schnitt des Skalpells durch das Bindegewebe erfordert bei Linien als Grundelementen sehr viel weniger Rechenaufwand als bei Dreiecken. »Trotzdem bewegen wir uns an der absoluten Grenze dessen, was moderne Grafikkarten und Rechenprozessoren leisten können«, sagt Alexandra Schaeffer.

Letztlich besteht die Oberfläche des fiktiven Organs aus mehreren übereinander liegenden Schichten von Texturmodellen, die als Dateien gespeichert sind. Taucht der Rechner durch einen Schnitt in die nächste Ebene ein, etwa von der Oberfläche der Gallenblase in die aufgetrennte Innenwand, ordnet er eine neue Textur zu. Das Kraftrückkopplungssystem ermittelt dazu die aktuelle Position, der Rechner kann dann aus der Datenbank die benötigte Texturdatei abfragen. Auch die Gewebeeigenschaften sind in einer Datenbank hinterlegt – von erfahrenen Chirurgen optimierte Messwerte. Dabei unterscheidet der Rechner zwischen dem Verschieben des Gewebes und Interaktionen wie Schneiden oder etwa Reißen. Jeder Aktion ist ein eigener Algorithmus zugeordnet, der die Kraftrückkopplung entsprechend steuert.

Der Aufwand scheint sich zu lohnen. Alexandra Schaeffer: »Bei ersten Demonstrationen unseres Systems ernteten wir ungläubige Blicke. Manche Ärzte waren davon überzeugt, dass sich im Inneren des LAP-Mentor-Geräts eine echte Gallenblase befindet.« Angesichts solcher Reaktionen geht die Geschäftsführerin davon aus, dass der Simulator künftig chirurgisches Training an lebenden Tieren ersetzen und sogar die Ausbildungszeit der Ärzte verkürzen kann. ◁

Operation einer virtuellen Gallenblase: Nach dem Freipräparieren aus dem umliegenden Bindegewebe wird sie mit einer Hakenelektrode aus dem Leberbett gelöst.

Tim Schröder ist freier Wissenschaftsjournalist in Oldenburg.

Der Ursprung der Malaria

Die gefürchtetste und häufigste Form der Malaria entstand erst, als Bauern die afrikanischen Tropen besiedelten. Um diese Malaria zu besiegen, braucht es neue Strategien.

Von Giacomo Maria Paganotti, Claudia Palladino und Mario Coluzzi

Malaria plagte die Menschen schon in der Antike. Vermutlich starb auch Alexander der Große an der Seuche. Doch die Ursache dieser plötzlichen schweren, oftmals tödlichen Fieberanfälle klärte sich erst im späten 19. Jahrhundert auf.

Die Römer glaubten, dass verpestete Luft *(mala aria)* in Sumpfgebieten die Krankheit hervorrufe – daher auch der Name »Sumpffieber«. Im Mittelmeerraum ließ sich die Malaria im letzten Jahrhundert durch massive Bekämpfung vielerorts ausrotten. Doch in den Tropen, den Subtropen und den Savannengebieten wütet das »Wechselfieber« – was die bei einigen Formen periodisch wiederkehrenden Fieberschübe bezeichnet – mehr denn je.

Vier Malariaformen befallen den Menschen. Die heimtückischste und bei weitem gefährlichste ist die inzwischen weltweit verbreitete »Malaria tropica«. In Afrika verursacht sie über neunzig Prozent der Malariaerkrankungen und auch mit Abstand die meisten malariabedingten Todesfälle. Wenn diese Infektion nicht rechtzeitig behandelt wird, stirbt an ihr jeder Dritte, oft binnen weniger Tage. Die Malaria tropica fordert ihre Todesopfer hauptsächlich unter kleineren Kindern. Täglich sterben in Schwarzafrika schätzungsweise 3000 Kinder unter fünf Jahren an Malaria, von denen die Mehrzahl der Malaria tropica erliegt. Später erwerben die Menschen mit der Zeit eine gewisse Immunität. Auch sind in den Hauptverbreitungsgebieten viele Personen durch genetische Faktoren gegen sehr schwere Malaria gefeit.

Allgemein gilt Malaria als die häufigste Tropenkrankheit, welche dort die meisten Todesopfer fordert. Die Angaben variieren zwischen einer und 3 Millionen Toten im Jahr. Nach Schätzung der Weltgesundheitsorganisation erkranken jährlich über 300 Millionen Menschen an Malaria, neunzig Prozent davon in Schwarzafrika.

Lebenslange Gehirnschäden

Wenig bekannt ist, dass Malaria auch das Gehirn beeinträchtigen kann. Viele der Kinder, die eine schwere Malaria überstehen, tragen neurologische Langzeitschäden davon. Die frühere Generaldirektorin der Weltgesundheitsorganisation Gro Harlem Brundtland erklärte deswegen die Malaria zur ersten Ursache für krankheitsbedingte Armut und für bei Kindern auftretende Entwicklungsverzögerungen in tropischen Ländern.

Die auffallende Aggressivität der Malaria tropica konnten Wissenschaftler bisher schwer erklären. Deren Erreger verhält sich auch sonst in mehrerer Hinsicht deutlich anders als die anderen drei Formen: So verbleibt er im Gegensatz zu ihnen nicht jahrelang im Körper. Auch treten die Fieberschübe, falls der Kranke den ersten überlebt, nicht in regelmäßigen Abständen auf.

Neuere genetische und ökologische Forschungen ergeben endlich ein in vielem schlüssiges Szenario von der Herkunft der Malaria tropica, auch wenn, um die Krankheit besiegen zu können, immer noch zu viele Fragen offen sind. An dieser Evolution, die hier in groben Zügen nachgezeichnet werden soll, wirkten drei Organismen mit:

- der einzellige Erreger *Plasmodium falciparum*; er benutzt bestimmte Stechmücken als Hauptwirt, in denen er sich geschlechtlich fortpflanzt und vermehrt; der Mensch dient ihm nur als Zwischenwirt: In seinen Leber- und vor allem roten Blutzellen vervielfältigt er sich rasant durch massive Teilung;
- Stechmücken der Art *Anopheles gambiae*; deren ursprüngliche Heimat waren afrikanische feuchte Savannen und Subtropen; doch die Moskitos folgten dem Menschen in die tropischen Wälder und legten sich dort auf ihn fest; später gelang es ihnen, sich auch an trockenere afrikanische Lebensräume in der Nähe des Menschen anzupassen;
- und der Mensch selbst. Letztlich hat der Mensch in tropischen und Savannenregionen Westafrikas praktisch Mückenpopulationen herangezüchtet, die dem Erreger der Malaria tropica als Hauptwirt dienen und auf den Menschen fixiert sind. Damit bot der Mensch diesem Erreger Bedingungen, die ihn erst so gefährlich werden ließen.

AG. FOCUS / SPL / VOLKER STEGER

Dass die Malariaerreger parasitische Einzeller sind, entdeckte der französische Arzt C.L. Alphonse Laveran im Jahr 1880 in Algerien. Später fand er sie auch im Blut von Kranken aus der Gegend um Rom. Schon bald erkannten italienische Forscher, dass die verschiedenen Malariaformen auf unterschiedliche Arten dieser »Plasmodien« zurückgehen. Sie befallen Leberzellen und vor allem die roten Blutkörperchen. Fieberschübe treten auf, wenn die roten Blutzellen zerfallen, in denen sich die Plasmodien massiv vermehrt haben.

Die schwerste, wie gesagt ohne medizinische Behandlung in jedem dritten Fall tödliche Form – die Malaria tropica – verursacht *Plasmodium falciparum*. Meist weniger schwer und selten tödlich verlaufen Infektionen mit *Plasmodium vivax*, *P. malariae* und dem erst später entdeckten *P. ovale*.

Nur die Weibchen der Fiebermücken saugen Blut. Das hier gezeigte Tier ist eine *Anopheles gambiae*, eine Hauptüberträgerin der Malaria tropica.

Von Mensch zu Mensch ist Malaria nicht übertragbar. Vielmehr braucht es dazu Blut saugende Mücken. Erst Ende des 19. Jahrhunderts entdeckte der englische Arzt Ronald Ross in Indien, dass ▷

▷ Stechmücken den Einzeller auf den Menschen übertragen. Wie dann herauskam, sind dies die Gabel- oder Fiebermücken, wissenschaftlich *Anopheles*. Nur deren Weibchen können infektiös sein, denn nur sie saugen an Wirbeltieren Blut, mit dem sie ihre Eier ernähren.

Diese Erkenntnisse halfen im 20. Jahrhundert zwar, die Malaria vielerorts wirksam einzudämmen und in manchen Regionen sogar auszurotten, wie fast überall im Mittelmeerraum. Doch gerade im stark durchseuchten mittleren Afrika, also südlich der Sahara, gelang das nicht. Dort ist die Infektionsrate sogar nach wie vor erschreckend hoch. Während die Menschen in anderen tropischen Malariagebieten – wie Südamerika und Asien – im Schnitt etwa einmal im Jahr von einer infektiösen Malariamücke gestochen werden, rechnet man in dörflichen Gebieten Schwarzafrikas für den Einzelnen mit weit über hundert infektiösen Stichen pro Jahr.

Der Erreger der Malaria tropica gibt der Forschung manches Rätsel auf. Zu den wichtigsten Fragen gehört, wieso diese Krankheit besonders in Afrika grassiert und dort so schwer zu bekämpfen ist. Eine Antwort darauf lautet, dass dieser aggressive Parasit sich offenbar im tropischen Afrika entwickelte, dann durch Neuanpassungen auch afrikanische Savannengebiete eroberte und sich so fest im menschlichen Umkreis etablieren konnte, dass sich sein Vermehrungszyklus mit bisherigen Mitteln nicht wirklich unterbrechen lässt.

Erstaunlich ist schon die Evolutionsgeschichte von *Plasmodium falciparum*. Auf den ersten Blick erscheint manches daran paradox. Schon vor mehreren Jahrzehnten erkannten Forscher, was auch neue genetische Untersuchungen bestätigen: dass sein nächster Verwandter nicht etwa einer der anderen drei Malariaerreger ist, die den Menschen befallen. Vielmehr steht *falciparum* einem Parasiten am nächsten, der Schimpansen und Gorillas infiziert. Wissenschaftler stellen diese beiden Plasmodien zusammen in die Untergattung *Laverania*.

Ein Malariaerreger mit widersprüchlichen Eigenschaften

Genetische Vergleiche ergaben weiterhin, dass *Plasmodium falciparum*, im Gegensatz zu den anderen menschlichen Malariaerregern, nicht Plasmodienarten anderer Säugetiere gleicht. Vor zehn Jahren kam heraus, dass die *Laveriana*-Arten offenbar direkt von Vogel-Plasmodien abstammen. War der Erreger vor relativ kurzer Zeit von Vögeln auf die höheren Primaten übergesprungen, hatte Menschen und Schimpansen befallen und dann in diesen neuen Wirten zwei getrennte Linien gebildet? Allerdings berechneten Forscher kürzlich anhand von genetischen Mutationen, dass sich die beiden Plasmodienarten schon vor 6 bis 8 Millionen Jahren voneinander getrennt zu haben scheinen, also in der Phase, als sich die menschliche Linie von der der Menschenaffen abspaltete. Das würde bedeuten, dass *Plasmodium falciparum* die Hominiden seit Beginn ihrer Evolution heimsuchte.

Ist die gefährliche Malaria tropica wirklich so alt? Aus epidemiologischen Überlegungen erscheint das schwer nachvollziehbar. Ein Parasit, der sich über einen so langen Zeitraum beim selben Wirt behaupten kann, darf sich eigentlich nicht dermaßen aggressiv verhalten. Seine Strategie wäre eher, nur leichte Krankheitssymptome hervorzurufen. Andernfalls könnte er sich in dieser Form nicht so lange halten. Mediziner haben dieses Wechselspiel bei vielen Krankheitserregern festgestellt.

Hinzu kommt, dass ein solcher Parasit in nomadischen Jäger-Sammler-Gemeinschaften nur dann langfristig überlebt hätte, wenn er praktisch mit den Menschen mitgezogen wäre. Er hätte also Wege finden müssen, um nach einer Infektion lange genug in deren Körper zu überleben. In der Weise haben sich die anderen menschlichen Malariaerreger angepasst, und so verhält sich auch der Erreger der afrikanischen Menschenaffen. Doch *Plasmodium falciparum* überdauert im Menschen nicht lange.

Trotzdem ist *falciparum* augenscheinlich ein sehr alter Parasit des Menschen. Das Paradox lässt sich nur dadurch erklären, dass dieser Erreger irgendwann, und zwar vor relativ kurzer Zeit, seine Eigenschaften völlig veränderte. Früher muss er weniger verheerend gewirkt haben, und erst spät wurde er aus irgendwelchen Gründen plötzlich so aggressiv.

Hier beginnt die komplizierte Geschichte des zweiten Wirts im Vermehrungszyklus der Plasmodien, der Fiebermücke *Anopheles*. Die Evolution einer besonders für *P. falciparum* günstigen Stechmückenart spielte sich offensichtlich im tropischen Afrika ab.

Weltweit gibt es Hunderte von *Anopheles*-Arten. Auch in Deutschland leben ein paar, die in warmen Wetterphasen unter günstigen Brutbedingungen Malaria übertragen könnten – und dies früher auch getan haben. Hier interessiert aber eine Artengruppe, die Wissenschaftler als *Anopheles-gambiae*-Komplex zusammenfassen. Dazu gehören mindestens sieben morphologisch nicht zu unterscheidende Arten. Biologisch, also in ihren ökologischen Ansprüchen, ihren physiologischen Anpassungen sowie in ihrem Verhalten und ihrer Gefährlichkeit als Malariaüberträger unterscheiden sich diese Moskitos allerdings sehr deutlich.

Die beiden wichtigsten Arten des Komplexes, die in Schwarzafrika zu den Hauptüberträgern der Malaria gehören, sind *Anopheles gambiae* im engeren Sinne und *A. arabiensis*. Die anderen Arten dieser Gruppe sind zweitrangig und kommen nur lokal vor.

Neben *A. gambiae* und *A. arabiensis* agiert als dritte wichtige Überträgerin die Art *A. funestes*. Diese drei Arten und ihre diversen Unterformen unterschei-

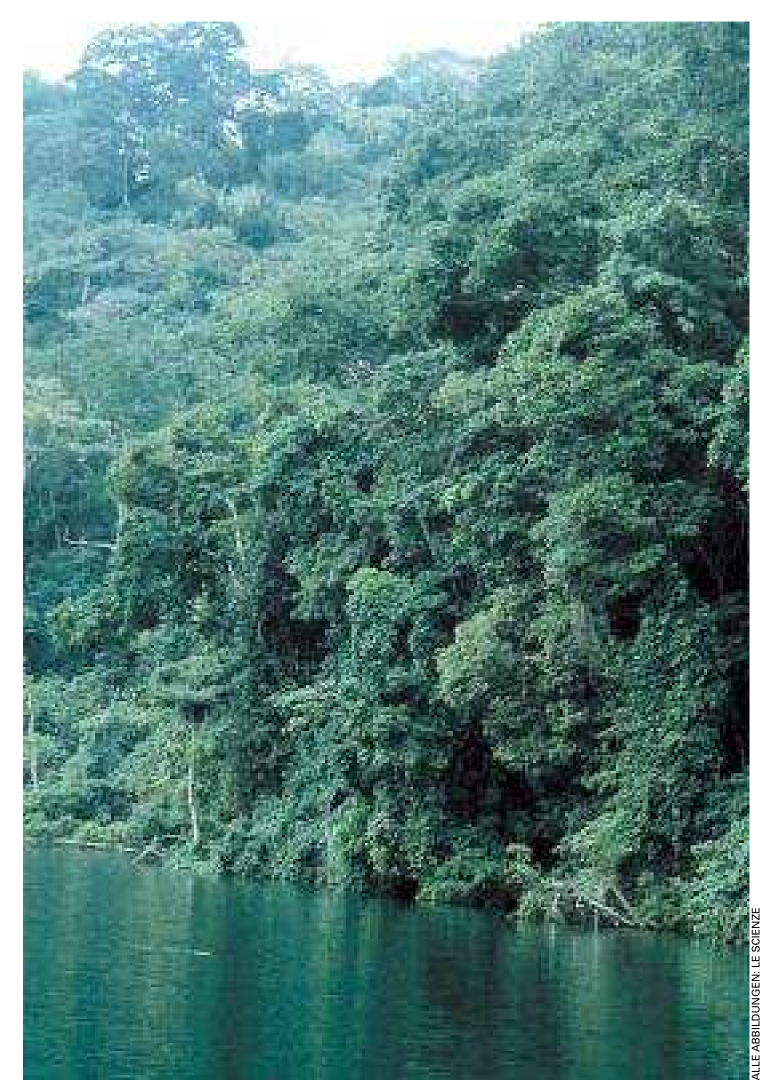
IN KÜRZE

▶ Die **Malaria tropica**, die schwerste und gefährlichste Malariaform des Menschen, stammt aus dem tropischen Afrika.

▶ Dort verwandelte ihr Erreger sich erst vor wenigen tausend Jahren aus einem harmloseren in den **hochaggressiven Parasiten**.

▶ Diese Verwandlung geschah, nachdem der **Mensch** in den **afrikanischen Tropen und Subtropen** als Bauer tätig wurde. Seine Siedlungen veranlassten bestimmte Stechmücken, sich dorthin zu verbreiten und eng an den Menschen anzuschließen. Diese Moskitos förderten dann die Entstehung der Malaria tropica. Später dehnten sie ihren Lebensraum durch **neue Anpassungen** bis an den Rand der Sahelzone aus.

▶ Die herkömmlichen **Bekämpfungsmaßnahmen** genügen nicht, um die Malaria tropica in ihrem Kerngebiet wirksam zu unterdrücken.





ALLE ABBILDUNGEN: LE SCIENZE

Als der Mensch tropische Urwälder rodete und Freiflächen schuf, entstand die Malaria tropica.

den zu können, ist für neue Bekämpfungsprogramme entscheidend.

Dass gerade diese drei Mückenarten besonders gefährlich sind, hängt damit zusammen, dass sie sich stark auf den Menschen fixiert haben. Bei *funestes* und *gambiae* ist der Zug extrem ausgeprägt. Bei *arabiensis* scheint die Evolution noch in Gange zu sein. In manchen Regionen gibt es von dieser Art noch Populationen, die genauso gut auch mit Huftieren vorlieb nehmen.

Die Geschichte der Malaria tropica knüpft sich eng an die Evolution von *Anopheles gambiae*. Unseren Studien zufolge entstand die Art einst im afrikanischen tropischen Regenwald. Sie ist dort heute noch verbreitet, behauptet sich aber in einzelnen Unterformen inzwischen auch gut in Feuchtsavannen – sowie bei genügend Wasserstellen in trockeneren Savannen.

Der Regenwald war ursprünglich sicher nicht die Heimat dieser Mücken. Deren Larven wachsen nämlich in besonnten Pfützen heran, wie sie in Feuchtsavannen während der Regenzeit auftreten. Die Ränder dieser Tümpel sind nicht von Schatten spendenden Pflanzen bewachsen wie etwa die sumpfigen Gewässer, wo sich die Larven italienischer Fiebermücken wohl fühlen.

Tief im Regenwald hätten sich allerdings die Larven von *gambiae*-Mücken höchstens an Flussufern entwickeln können. Wie konnten sich diese Moskitos dort trotzdem so massiv ausbreiten? Unsere Forschungsergebnisse besagen, dass der Mensch ihnen dazu verhalf. Indem er Waldflächen rodete, schuf er für sie ideale Brutbedingungen. Sie fanden nun in den regenreichen Tropen stets geeignete Wasserstellen vor. Wahrscheinlich brachte der Mensch diese Stechmücken schon aus der Savanne mit.

Die Moskitoweibchen brauchten aber auch Säugetiere, die ihnen Blut lieferten. Die meisten Arten dieser Gruppe nehmen mit anderen Säugern, zum Beispiel mit Huftieren, genauso vorlieb wie mit dem Menschen. Jedoch besaßen die ersten Bauern, die in den afrikanischen Tropenwald vordrangen, vermutlich kaum Vieh. Es wäre dort von der Schlafkrankheit dezimiert worden, die ebenfalls von Moskitos übertragen wird.

Also war es für diese Mücken am naheliegendsten, Menschen anzuzapfen, die ja ohnehin überall dort lebten, wo die Mücken nun im Regenwald Brutstätten fanden. So müssen sich die Mücken fast zwangsläufig eng an den Menschen angeschlossen haben. Die Anpassungen gingen so weit, dass diese neue Stechmückenart sich auch auf die menschlichen Behausungen einstellte und sogar Innenräume bewohnte. ▷

AG. FOCUS / SPL

Zwei Erreger der Malaria tropica (blau-rosa) in einem roten Blutkörperchen zeigt diese elektronenmikroskopische Falschfarbenaufnahme.

Diese Moskitos scheinen ihr Verhalten recht plötzlich völlig auf den Menschen umgestellt zu haben. Wann kann das frühestens gewesen sein? Dafür kommt im Afrika südlich der Sahara nur die Phase in Frage, nachdem sich in den Savannen ein einfacher Ackerbau etabliert hatte. Danach, vor 5000 bis 6000 Jahren, begann auch in Waldgebieten ein Feldbau. In tropischen Wäldern des zentralen Afrika tauchten Ackerbauern jedoch erst vor frühestens 2900 Jahren auf, während des letzten Abschnitts der Jungsteinzeit, oder sogar erst zu Beginn der Eisenzeit vor etwa 2400 Jahren.

Bei diesem Vorstoß half ein Klimawandel. Pollenuntersuchungen zeigen, dass die Tropen vor ungefähr 2800 bis 2500 Jahren vorübergehend trockener wurden und die Wälder sich lichteten. Diese Phase dauerte bis vor rund 2000 Jahren an. Anschließend wurde es wieder feuchter und die Wälder verdichteten sich wieder.

Mit der Evolution der auf den Menschen fixierten Fiebermücke *Anopheles gambiae* Hand in Hand ging, so vermuten wir, die Evolution des aggressiven Erregers der Malaria tropica. Anzunehmen ist, dass diese Mücken schon damals mitunter das *Plasmodium falciparum* beherbergten – das ja wahrscheinlich während der menschlichen Evolution sporadisch immer wieder auftauchte. Allerdings dürfte das zunächst noch ein viel weniger gefährlicher Parasit gewesen sein. Auch kam er sicherlich nur an manchen Orten vor und löste nur gelegentlich kleinere Epidemien aus.

Nun aber setzte, so vermuten wir, unter den Erregerstämmen ein Wettlauf ein. In den menschlichen Ansiedlungen im Urwald, in denen die Überträgermücken sich bestens vermehrten und nur noch einen Blutlieferanten – den Menschen – hatten, bekamen die jeweils aggressivsten Formen der Plasmodien ihre besondere Chance. Denkbar ist, dass Menschen jetzt oft von mehreren, etwas verschiedenen Erregerstämmen gleichzeitig infiziert wurden, die nun in Konkurrenz zueinander traten. Unter solchen Bedingungen konnte sich leicht ein Klon entwickeln, der sich im Menschen besonders rasant vermehrte und dadurch die anderen übervorteilte. Vielleicht entstand so im Zuge wiederholter Epidemien schnell die hochvirulente Malaria tropica.

Kennzeichen des Siegers: Aggressivität

In anderen Worten – die Plasmodien der *Laveriana*-Gruppe blieben vergleichsweise wenig gefährlich, solange sie nur Menschenaffen beziehungsweise umherziehende Jäger-Sammler-Völker vorfanden. Auch für die frühen Hirten und Bauern der Savannen waren sie eher harmlos. Welche Mückenarten jahrmillionenlang als Überträger dienten, war zweitrangig. Teilweise mögen das ganz verschiedene Fiebermücken gewesen sein, die auch heute noch manchmal Malaria übertragen. Doch als sich ein Moskito auf den Menschen festlegte und in dessen Siedlungen hervorragend behaupten konnte, änderten sich die Umweltbedingungen für den Parasiten radikal und er reagierte auf den neuen Selektionsdruck.

Wie aber konnte sich die Malaria tropica anschließend über die Tropen hinaus weltweit ausbreiten? Und wann geschah das? Wiederum hatten die *Anopheles*-Mücken mit ihrer Anpassungsfähigkeit an neue Umweltbedingungen daran großen Anteil.

Einen wesentlichen Beitrag leistete auch diesmal wieder *Anopheles gambiae*. Diese Moskitoart lebt in Afrika heute nicht nur in tropischen Gebieten, sondern ist auch in Savannenregionen sehr verbreitet. Dort treten mehrere Unterformen auf, die sich genetisch von ihrer tropischen Stammform und auch voneinander unterscheiden. Teilweise lassen die Formen sich nur noch eingeschränkt miteinander kreuzen. Offensichtlich ist diese Fiebermücke dabei, sich in mehrere neue Arten aufzuspalten.

Wie genetische Studien erwiesen, entstanden die eigenen Unterformen – oder auch schon neuen Arten – erst in den letzten paar tausend Jahren. Offensichtlich erwarben manche davon Anpassungen, die ihnen erlauben, in recht trockenen Regionen zu leben.

Die Unterformen von *Anopheles gambiae* unterscheiden sich teilweise stark in ihren ökologischen Ansprüchen, so vor allem in ihrer Anpassung an die Klimaverhältnisse. Durch sie hat *A. gam-*



LE SCIENZE

Die Larven der gefährlichsten afrikanischen Fiebermücken für Malaria tropica leben in besonnten Pfützen.

Zwei Wirte im Vermehrungszyklus

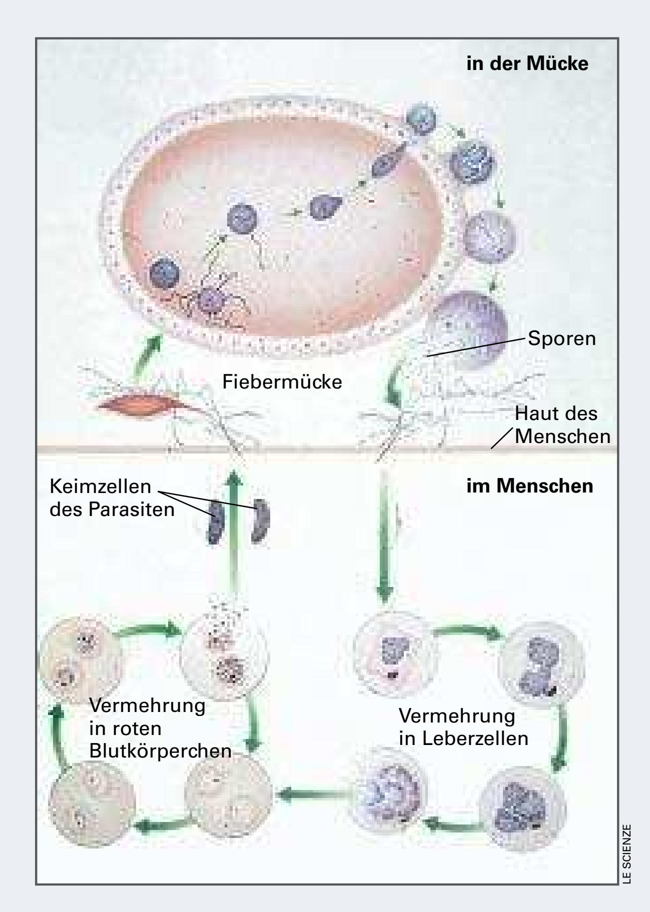
Die Malaria verursachenden Parasiten sind Plasmodien und gehören zu den Einzellern. Sie treten in rund 200 Arten auf. Einige befallen Vögel oder Reptilien, andere Säugetiere. Vier davon können den Menschen infizieren: *Plasmodium falciparum*, *P. vivax*, *P. ovale* und *P. malariae*. (*P. falciparum* erzeugt die besonders gefährliche Malaria tropica; *vivax* und *ovale* die Malaria tertiana; und *P. malariae* die Malaria quartana.)

Alle vier Erreger wechseln für ihre Vermehrung zwischen Mensch (oder manchmal auch einem anderen Säugetier) und Moskito. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in der Pathogenität für den Menschen und darin, wie schnell sie sich in den roten Blutkörperchen vermehren.

Der Mensch wird infiziert, wenn ein selbst infiziertes Moskitoweibchen – eine *Anopheles*-Mücke – an ihm Blut saugt. Sie überträgt den Parasiten im Sporenstadium mit ihrem Speichel. Über das Blut gelangen die Sporen in die Leber, in deren Zellen sie sich vielfach teilen. Die neuen Plasmodien nisten sich in roten Blutkörperchen ein. Nun verändern sie ihre Gestalt und teilen sich wiederum vielfach. Das rote Blutkörperchen zerfällt und die Parasiten befallen neue rote Blutzellen. Gewöhnlich gehen gleichzeitig Tausende der Blutkörperchen zu Grunde. Das verursacht die Fieberanfälle.

Einzelne der Parasitenzellen wachsen in den roten Blutkörperchen zu Geschlechtszellen heran. Diese Zellen entwickeln sich erst weiter, wenn ein Blut saugender Moskito sie aufgenommen hat. Sie differenzieren sich in dessen Darm in weibliche und männliche Keimzellen. Im Insektendarm findet auch die Befruchtung statt.

Die neue Generation bildet schließlich eine kugelige Zyste aus, in der sich der Parasit wiederum vielfach vermehrt. Am Ende des Zyklus wandern diese Sporen unter anderem in die Speicheldrüsen der Steckmücke.



LE SCIENZE

biae zeitweise trockenere Lebensräume zurückerobert.

Zur Savannentauglichkeit der *gambiae*-Mücken hat wesentlich beigetragen, dass einige Populationen von ihnen sich irgendwann mit der Art *arabiensis* gekreuzt haben müssen. Diese Art kam wohl schon immer mit Trockenheit besser zurecht. Wahrscheinlich entstand sie überhaupt in Savannengebieten, und zwar als Parasit von Huftieren und somit von Viehzüchtern und ihren Herden. Nachweislich übernahmen einige Gruppen von *gambiae* nun genetische Eigenschaften der älteren Savannenart.

Für die Verbreitung der Malaria tropica hatte das schwer wiegende Folgen: Wo immer der Mensch in den westafrikanischen Subtropen und Savannen Felder bewässerte, fand sich auch der Erreger ein (siehe Bilder S. 85). Zudem blieb jetzt *Anopheles gambiae* nicht der einzige Überträger. Andere *Anopheles*-Arten, vor allem *A. arabiensis* und *A. funestes*, beteiligten sich ebenfalls. Im Verein mit dem Menschen haben diese Moskitos mitgewirkt, die Malaria tropica im afrikanischen Savannengürtel bis zum Rand der Sahelzone zu verbreiten. Die für die heutigen menschlichen Bevölkerungen dieser Regionen fatale Folge davon ist, dass in ihrem Lebensbereich praktisch zu jeder Jahreszeit überreichlich infektiöse Mücken lauern.

Eroberung der antiken Welt

In andere Weltregionen gelangte der Erreger der Malaria tropica tatsächlich erst später, wie genetische Stammbaumanalysen ergaben. Dass diese Malariaform durch den Menschen leicht ins tropische Asien kam, verwundert nicht. Dort leben *Anopheles*-Mücken, die mit den afrikanischen Arten eng verwandt sind.

Schwieriger muss es für den Erreger gewesen sein, nach Europa vorzudringen. Zum einen sind die dortigen *Anopheles*-Arten anders, zum anderen stand der Verbreitung das kältere Klima im Wege. Zumindest scheint der Parasit einige Zeit gebraucht zu haben, bis er nach Südeuropa vordrang. In Italien ist die schwere Malaria offenbar erst kurz vor der Zeitenwende aufgetaucht. Im 7. und 6. vorchristlichen Jahrhundert gründeten die Griechen in Süditalien noch erfolgreich viele Städte. Am Ende des 1. nachchristlichen Jahrtausends bis ins 20. Jahrhundert hinein siedelten Menschen dort nicht mehr. Sie wussten, dass man sich hier ein lebensgefährliches Fieber holen konnte. Sogar Rom galt seit dem 5. Jahrhundert bis in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts als »Stadt des Pesthauchs«. Archäologen vermuten, dass im 5. nachchristlichen Jahrhundert am mittleren Lauf des Tibers eine verheerende Malariaepidemie auftrat. Bei Lugnano fanden sie einen Kinderfriedhof, wo auffallend viele Kleinkinder und Fehlgeburten bestattet wurden. Die Untersuchungen lassen annehmen, dass viele dieser Kinder tatsächlich an Malaria starben.

Sehr aufschlussreich für die Verbreitungsgeschichte der Malaria tropica sind genetische Eigenschaften von heutigen Bevölkerungen in Malariagebieten, die mehr oder weniger gegen die Krankheit ▷

▷ schützen. Im Mittelmeerraum vermochten die Menschen Fiebergebiete in den gefährlichen Sommermonaten weitgehend zu meiden. Doch an vielen anderen Orten, so auch in Afrika, konnten sie nicht ausweichen.

In solchen Regionen verbreiteten sich in der Bevölkerung mit der Zeit genetische Mutationen, die Vorteile gegenüber der Krankheit brachten. Populationsgenetiker kennen inzwischen eine Reihe solcher genetischen Anpassungen. Auch zeigen der Anteil und die Art solcher Mutationen in einer Population an, wie stark dort die Infektionsgefahr war und wie lange Malaria dort schon vorkommt.

In der Regel betreffen die Mutationen Eigenschaften der roten Blutkörperchen. Die Veränderungen erschweren es den Plasmodien, sich darin zu vermehren. Einige der Mutationen schaden allerdings auch dem Menschen. Das gilt etwa für die Sichelzellenanämie. Bei dieser Krankheit verformen sich die roten Blutkörperchen bei Anstrengung und Sauerstoffmangel wegen eines Defektes des roten Blutfarbstoffs Hämoglobin. Kinder, die das Merkmal von beiden Eltern erben, sind nicht lebensfähig. Erben sie es nur von einem Elternteil, setzt ihnen aber Malaria weniger stark zu.

Eine andere Mutation am roten Blutfarbstoff, die Variante Hämoglobin C, beeinträchtigt die Person praktisch nicht. Wer sie von den Eltern in doppelter Ausführung erbt, der erkrankt nur sehr leicht. In einfacher Ausführung ist die Wirkung allerdings geringer als bei der Sichelzellenanämie. Auffälligerweise haben sehr viele Menschen in Westafrika Hämoglobin C. Wie es aussieht, kam die Mutante genau in der Region auf, wo *Anopheles gambiae* den genetischen Daten zufolge zurück in die Savanne fand. Offensichtlich war in diesem Gebiet die Malarialast so hoch, dass sich beim Menschen eine solche Mutation durchsetzen konnte, die erst doppelt wirklich hilft.

Evolution von Schutzfaktoren in den Hauptmalariagebieten

Des weiteren gibt es Varianten eines Enzyms im Zuckerstoffwechsel der roten Blutkörperchen, die zwar auch dem Menschen schaden, aber die Vermehrung der Malariaerreger behindern. Diese Mutationen des Gens für die Glucose-6-Phosphat-Dehydrogenase sagen einiges über die Verbreitungsgeschichte der Malaria tropica. Zwei Varianten wurden genauer erforscht: Die eine, »A^-«, kommt in Schwarzafrika vor, die andere, »Med«, ist von Südeuropa über den Nahen Osten bis Indien verbreitet.

Populationsgenetiker haben berechnet, dass sich die Variante A^- vor knapp 4000 Jahren in afrikanischen Malariagebieten etabliert haben dürfte. Und zwar scheint diese Mutation mehrfach gleichzeitig an verschiedenen Orten aufgetreten zu sein und hat sich dann weitervererbt. Die Variante Med scheint sich dagegen erst vor etwa 1500 Jahren merklich durchgesetzt zu haben. Diese Befunde passen gut zur postulierten Ausbreitung der Malaria tropica.

Forschungsergebnisse wie die hier dargestellten sind extrem wichtig, um die Malaria tropica irgendwann doch zu besiegen. Denn der Kampf gegen Malaria bedeutet hauptsächlich, gegen diese schwerste Form der Krankheit vorzugehen. In Randgebieten ihrer Verbreitung erweisen sich die bisherigen Methoden, den Fortpflanzungszyklus des Parasiten zu durchbrechen, durchaus als wirksam und sind auch weiterhin sinnvoll. Zu solchen Regionen gehören Hochlagen, eher trockene Gegenden sowie auch nördlichere Breiten wie der Mittelmeerraum. In jenen Gebieten bricht diese schwere Malaria höchstens gelegentlich als Epidemie aus. Dort gab es in der Vergangenheit gute Erfolge, wenn man die Überträgermücken bekämpfte – unter anderem in Innenräumen Insektenmittel versprühte – und den Menschen zugleich zeigte, wie sie sich etwa mit imprägnierten Mückennetzen vor Stichen schützen konnten. Sogar im tropischen Asien und Amerika bewähren sich diese Methoden gut.

In den Hauptmalariagebieten Afrikas, besonders in den west- und zentralafrikanischen Savannen, genügt das alles nicht. Durch Insektenbekämpfung und -schutz in den Häusern und außerhalb kann es dort nie gelingen, die infektiösen Mückenpopulationen so weit zu verringern, dass der Vermehrungszyklus der Plasmodien unterbrochen wird.

Evolution

Stammbäume für Fiebermücken mit Hilfe von Riesenchromosomen

Die Malariamücke *Anopheles* bildet, wie andere Fliegen und Mücken auch, in einigen sehr stoffwechselaktiven Organen und Zellen so genannte Riesenchromosomen aus. Solche mikroskopisch sichtbaren Gebilde aus genetischem Material entstehen durch Vervielfachung der Erbstränge des Chromosoms, die aber zusammengelagert bleiben. Sie sind einige hundert Mal größer als einfache Chromosomen.

Diese Riesenchromosomen zeigen charakteristische artspezifische Bandenmuster. An Stellen besonderer genetischer Aktivität blähen sich einzelne Banden zudem zu so genannten Puffs auf. Diese Muster erlauben, Fiebermückenarten und auch einzelne Populationen voneinander zu unterscheiden.

Für die Arten und Untergruppen des *Anopheles-gambiae*-Komplexes ließ sich anhand der Chromosomenmuster ein Stammbaum erstellen. Die untersuchten Riesenchromosomen stammten aus den Speicheldrüsen der Larven und aus den Nährzellen der Eizellen.


LE SCIENZE

AG. FOCUS / SPL

Vor allem Kinder sind Malariaopfer. An der Seuche sterben in Schwarzafrika täglich 3000 von ihnen.

Denn in Westafrika hat sich der Erreger der Malaria tropica längst festgesetzt. Seine Hauptwirte, die Fiebermücken, haben sich dort mit ihren verschiedenen Arten und deren Unterformen in zu vielen ökologischen Nischen fest etabliert. Vor allem *Anopheles gambiae* hat sich dort in der Nähe der Menschen zu gut eingerichtet. Auch tragen viel zu viele Menschen den Erreger in sich. Besonders die Kinder verbreiten ihn immer neu. In der Fachsprache: Die Infektionslast ist zu jeder Zeit viel zu hoch.

Einzige Chance: Ausrottung

Vertrackterweise würde infolge herkömmlicher Schutzmaßnahmen in der Bevölkerung außerdem der durch Malariakontakt aufgebaute Immunschutz sinken. In diesen stark verseuchten Regionen wäre die Folge davon, dass die nächste Malariainfektion umso heftiger verliefe. Darum kann das oberste Ziel nur sein, die Malaria auszurotten.

In Schwarzafrika müssen dazu zwei Strategien vorangetrieben werden. Zum einen sollte man unverzüglich alles tun, um die Zahl der Malariaerkrankungen und Sterbefälle deutlich zu verringern, was fast dasselbe ist, wie die Zahl der Malariafälle unter den Kindern drastisch zu senken. Leider stehen dem noch viele Hindernisse entgegen, die nicht nur von den ökonomischen und politischen Verhältnissen herrühren, sondern auch von der soziokulturellen Einstellung. Damit, dass Kinder sterben, finden sich dort viele Verantwortliche ab.

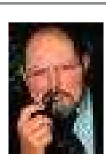
Auf Schutzmaßnahmen wie Insektennetze und lang wirkende Mückenmittel darf man zwar nicht verzichten. Doch ebenso wichtig ist, dass endlich infizierte und erkrankte Personen sofort Zugang zu einer medizinischen Behandlung erhalten, egal wo sie leben. Malaria wäre fast immer heilbar, vorausgesetzt, die Therapie erfolgt rechtzeitig und Medikamente sind verfügbar, gegen die die örtlichen Erreger noch keine Resistenz ausgebildet haben. Zwar scheinen die epidemiologischen Daten bisher dagegen zu sprechen, doch auch die meisten erkrankten Kinder würden überleben. Der Entwicklungsstand eines Landes und der Lebensstandard dürfen nicht länger ein Hindernis darstellen, auch nicht in den ärmsten ländlichen Gebieten. Jedoch bildet der Zugang zu Medikamenten und einer ausreichend lang anhaltenden medizinischen Versorgung in Afrika noch eines der größten Probleme.

Die zweite Strategie, um die Malaria in ihren Kerngebieten auszurotten, kann nur langfristig angesetzt sein. Erforderlich sind dazu weiterhin umfassende Forschungen. So brauchen wir unbedingt neue Medikamente gegen resistente Stämme. Zu den dringendsten Zielen gehört die lange schon angestrebte Malariaimpfung. Der Impfstoff sollte den Parasiten in mehreren seiner Stadien treffen. Kombiniert damit müsste man vor allem den Kindern einen jeweils wochenlang aktiven Wirkstoff verabreichen, der im Blut vorhandene Keimzellen des Erregers abtötet, sodass die Moskitos kein infektiöses Blut aufnehmen.

Andere Forschungsprogramme zielen darauf ab, Eigenschaften der Moskitos zu verändern. Unter anderem versuchen die Forscher, Stechmücken zu züchten, in denen sich der Malariaerreger nicht mehr vermehrt. Diese neuen genetischen Formen sollen dann die bisherigen verdrängen. Vielleicht gelingt es eines Tages aber auch, das Verhalten der Mücken so zu manipulieren, dass sie Menschen nicht mehr anfallen.

Die Malaria ist immer noch eine Geißel der Menschheit. Das liegt ganz wesentlich an der wirtschaftlichen, sozialen und politischen Situation der hauptsächlich betroffenen Regionen. Sie bereitet Seuchen wie der Malaria den Boden. Es handelt sich um die ärmsten und rückständigsten Länder, die oft außerdem unter Unruhen, Kriegen und Willkürherrschaft leiden. Für eine friedliche, demokratische Entwicklung und politische Stabilität dieser Staaten und eine gerechte Verteilung der Ressourcen tragen auch die Industrienationen Verantwortung. Der Traum von einer malariafreien Welt könnte sich erfüllen. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Giacomo Maria Paganotti und **Claudia Palladino** forschen zurzeit an der Universität Edinburgh. Paganotti untersucht genetische Varianten des Erregers der Malaria tropica. Palladino befasst sich mit Resistenzen von Malariaerregern. Vorher hat sie an der Universität »La Sapienza« in Rom die Ökologie der afrikanischen Malariamücken untersucht. **Mario Coluzzi** (Bild), einer der weltweit führenden Malariaexperten, erforscht Ökologie, Biologie und Genetik der Malariamücken und die Wechselbeziehungen zwischen dem Menschen, den Stechmücken und den Erregern. Er leitet an der Universität »La Sapienza« in Rom das Zentrum für Zusammenarbeit mit der Weltgesundheitsorganisation (WHO) über Epidemiologie der Malaria.

Plasmodium falciparum en Afrique Subsaharienne. Von Mario Coluzzi in: Annales de l'Institut Pasteur / actualités, Heft 13, S. 81, 2002

Malaria's recent origins. Artikel und Kommentare in: Science, Bd. 293, S. 389, 20. July 2001

The clay feet of the malaria giant and its african roots. Von Mario Coluzzi in: Parassitologia, Bd. 41, S. 277, 1999

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Mathematik der Gerechtigkeit

Gerechtigkeit für alle muss dasselbe sein wie Gerechtigkeit für zwei. Dieses Prinzip, in eine mathematische Form gebracht, hilft in vielen Fällen befriedigende Lösungen zu finden. Es steckt auch hinter einer Lehre des Talmuds, die 2000 Jahre rätselhaft geblieben war.

Von Michel Balinski

Victor Hugo meint: »Die materielle Welt beruht auf Gleichgewicht, die moralische Welt auf Gerechtigkeit.« Die Frage der Gerechtigkeit spielt immer dann eine zentrale Rolle, wenn ein Gut aufgeteilt wird, seien es Rentenansprüche, eine Erbschaft, Gewinn und Verlust unter Gesellschaftern, Parlamentssitze unter Parteien, Herzen, Nieren oder Lebern unter Transplantationspatienten. Ein physikalisches Gleichgewicht kann man im Allgemeinen errechnen; aber wie steht es mit der Berechnung der gerechten Aufteilung?

In der griechisch-römischen Tradition, die im christlichen Mittelalter und bis in unsere Zeiten hochgehalten wird, pflegt man sich auf den antiken Philosophen Aristoteles zu berufen. Dieser erklärt in seiner Theorie der distributiven Gerechtigkeit (Buch V der »Nikomachischen Ethik«, Kapitel 6 und 7): »Das Gerechte ist … etwas Proportionales … Die das Gemeinsame austeilende Gerechtigkeit verfährt immer nach der angegebenen Proportionalität; wenn zum Beispiel eine Geldverteilung aus öffentlichen Mitteln stattfindet, so muss sie nach dem Verhältnis geschehen, das die Leistungen der Bürger zueinander haben; und ungerecht im Gegensatz zum Gerechten ist, was diesem Verhältnis zuwiderläuft.«

Warum? Die Argumentation von Aristoteles bleibt undeutlich: »Dieses Gerechte ist das Mittlere zwischen den Extremen, die der Proportionalität zuwiderlaufen. Denn das Proportionale ist die Mitte, und das Gerechte ist das Proportionale.« Eine nachvollziehbare Begründung liefert der Philosoph hier nicht. Woher ist dann diese unverrückbare Gewissheit entstanden, dass beim Teilen eines Gutes »gerecht« dasselbe ist wie »proportional«? Aus schierer Gewohnheit, durch jahrhundertelange Tradition geheiligt?

Ich glaube vielmehr, dass es ein begründendes Prinzip gibt, das ich »Kohärenz« nennen und im Folgenden erläutern will. Das Kohärenzprinzip ist nicht ohne weiteres offensichtlich; aber es ist eine reichhaltige Quelle von Einsichten für unser Verständnis von Gerechtigkeit.

Zuvor will ich jedoch eine andere Interpretation von Gerechtigkeit vorstellen, die fast genauso alt ist und seit zwei Jahrtausenden Rätsel aufgibt. Der babylonische Talmud, das monumentale Werk des Judentums, ist die Grundlage der jüdischen Zivil-, Straf- und Religionsgesetze. Eines seiner Traktate, »Baba Meçia«, enthält die Vorschriften des Zivilrechts. Dessen erste Lehre, »die Regel des umstrittenen Gewandes«, kommt zu einem anderen Ergebnis als Aristoteles. Es lohnt sich, sie genauer zu betrachten.

Das umstrittene Gewand

»Wenn zwei ein Gewand halten und der Eine sagt, er habe es gefunden, und der Andere sagt, er habe es gefunden, oder der Eine sagt, das Ganze gehöre ihm, und der Andere sagt, das Ganze gehöre ihm, so schwöre der Eine, dass er daran nicht weniger als die Hälfte habe, und der Andere schwöre ebenfalls, dass er daran nicht weniger als die Hälfte habe, und sie teilen. Wenn der Eine sagt, das Ganze gehöre ihm, und der Andere sagt, die Hälfte gehöre ihm, so schwöre der, welcher sagt, das Ganze gehöre ihm, dass er daran nicht weniger als drei Viertel habe, und der, welcher sagt, die Hälfte gehöre ihm, schwöre, dass er daran nicht weniger als ein Viertel habe, alsdann erhält der Eine drei Viertel und der Andere ein Viertel.«

Wenn also zwei Personen die gleichen Rechte besitzen, so erhalten sie genau wie bei der Proportionalitätsregel gleiche Anteile; wenn aber eine Person das Ganze beansprucht und die andere die Hälfte, so spricht Aristoteles ihnen 2/3 und 1/3 zu, der Talmud hingegen 3/4 und 1/4. Zwei Erklärungen für diese Aufteilung kommen einem in den Sinn.

▶ (1) Die zweite Person beansprucht nur eine Hälfte, also tritt sie von vornherein jeden Anspruch auf die andere Hälfte an die erste Person ab, während diese das Ganze beansprucht. Daher erhält die erste zuerst die eine, unbestrittene Hälfte, danach wird die zweite Hälfte zwischen beiden gleich aufgeteilt. Die erste Person bekommt $1/2 + 1/4 = 3/4$ und die zweite 1/4.

▶ (2) Die erste Person, die das Ganze verlangt und drei Viertel erhält, verliert ein Viertel; die zweite verliert ebenfalls ein Viertel, da sie die Hälfte verlangt und ein Viertel bekommen hat. So stellt die Zuteilung sicher, dass beide den gleichen absoluten Verlust erleiden (Kasten auf der nächsten Seite).

Diese beiden Erklärungen können vom Einzelfall verallgemeinert werden. Stellen wir uns ein Gut im Werte von h Euro vor – ein Gewand oder die Konkursmasse eines Unternehmens –, auf das zwei Personen Ansprüche geltend machen, die erste im Wert von a_1 Euro, die zweite im Wert von a_2 Euro, sodass die Summe der Ansprüche den Wert des Gutes übersteigt: $a_1 + a_2 \geq h$. Nehmen wir an, dass keiner der beiden Eigentümer mehr als den Wert h des Gutes beanspruchen kann oder dass eine gesetzliche Vorschrift einen höheren Anspruch von Amts wegen auf h Euro beschränkt.

Nach Argumentation (1) werden die Zuteilungen z_1 und z_2 an die zwei Beteiligten wie folgt berechnet: Zuerst wird dem ersten das zugesprochen, was von dem zweiten nicht verlangt wird, nämlich $h - a_2$, und dem zweiten, was von dem ersten nicht verlangt wird, $h - a_1$. Dann wird der Rest, $a_1 + a_2 - h$, zwischen beiden zu gleichen Teilen aufgeteilt. Auf diese Weise erhalten wir die Zuteilungen $z_1 = (h + a_1 - a_2)/2$ und $z_2 = (h + a_2 - a_1)/2$.

Nach Erklärung (2) müssen die Verluste der Beteiligten gleich sein, $a_1 - z_1 = a_2 - z_2$. Da die Zuteilung das Ganze ausschöpfen muss, erhält man zudem die Bedingung $z_1 + z_2 = h$. Es ist einfach nachzuprüfen, dass dieses Gleichungs- ▷

▼ **Der babylonische Talmud, seit zwei Jahrtausenden überlieferte Quelle jüdischer Weisheiten, ist immer wieder kommentiert und interpretiert worden. Manche Stellen, die den Auslegern seit jeher Rätsel aufgaben, erweisen sich im Lichte der mathematischen Analyse als konsistente Lösungen eines schwierigen Zuteilungsproblems. So ist ein alter, scheinbar dunkler Text geeignet, auch gegenwärtige Streitigkeiten beizulegen.**

▷ system zu denselben Lösungen z_1 und z_2 führt wie Ansatz (1).

Anders hingegen Aristoteles, der Verfechter der Proportionalität. Er würde fordern, dass das Verhältnis von Zuteilung zu Anspruch bei beiden Beteiligten gleich ausfällt, $z_1/a_1=z_2/a_2$. Auch hier müssen die Zuteilungen wieder die ganze Verteilungsmasse ausschöpfen, $z_1+z_2=h$, sodass man als Lösungen $z_1=h\cdot a_1/(a_1+a_2)$ und $z_2=h\cdot a_2/(a_1+a_2)$ erhält, das sind im Fall des umstrittenen Gewandes 2/3 und 1/3.

Worin unterscheiden sich die beiden Vorschriften? Für den Talmud kommt es auf die Verluste selbst an, für Aristoteles dagegen auf die relativen Verluste. Wir wollen nun nicht untersuchen, welche dieser Sichtweisen die bessere Lösung liefert, sondern ob beide Vorschriften ein wesentliches Prinzip erfüllen, das ich jetzt erläutern möchte: die Kohärenz. Es kommt immer dann zur Geltung, wenn ein Gut unter mehr als zwei Parteien aufzuteilen ist, zum Beispiel ein Erbe unter vielen Geschwistern.

Kohärenz: eine Form von Widerspruchsfreiheit

Kurzgefasst besagt das Kohärenzprinzip: Gerechtigkeit für alle Beteiligten muss auf dasselbe hinauslaufen wie Gerechtigkeit für eine beliebige Teilmenge von ihnen. Am Beispiel erläutert: Nehmen wir an, eine Vorschrift bestimmt, dass ein Gut im Wert von 100 Euro unter drei Berechtigten A, B und C wie folgt aufzuteilen ist: 50 für A, 30 für B, 20 für C. Dann soll dieselbe Vorschrift angewandt auf den Fall, dass 80 Euro (die Anteile von A und B zusammen) unter A und B aufzuteilen sind, wieder die Teilung 50 zu 30 ergeben. Eine Vorschrift mit dieser Eigenschaft will ich kohärent nennen.

Die Forderung nach Kohärenz entspricht dem gesunden Menschenverstand. Stellen wir uns folgende Situation vor: Nachdem ein Erbe nach einer bestimmten Vorschrift unter vielen Erben aufgeteilt worden ist, tun sich zwei oder drei von ihnen zusammen, werfen ihre Anteile in einen Topf und teilen diese Vermögensmasse nach derselben Vorschrift unter sich auf. Wenn dabei etwas anderes herauskommt als zuvor, dann kann die ursprüngliche Zuteilung nicht gerecht gewesen sein: Die dabei verwendete Vorschrift war nicht kohärent.

Besonders heikel werden Aufteilungsfragen bei Gütern, die im Gegensatz zu Geld nicht beliebig teilbar sind. Bei der Zuteilung von Parlamentssitzen an Parteien oder auch Regionen ist der »Anspruch« einer Partei gleich der Anzahl der für sie abgegebenen Stimmen, und der »Anspruch« einer Region ist die Anzahl ihrer Einwohner. Die »Zuteilung« ist die Anzahl der Parlamentssitze für die jeweilige Partei bzw. Region; da aber Abgeordnete nicht teilbar sind, muss die Zuteilung eine ganze Zahl sein, was das Problem erschwert (siehe meine Beiträge in Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 74, und 10/2002, S. 72).

Kohärenz bedeutet in diesem Fall zum Beispiel Folgendes: In der französischen Nationalversammlung steht jedem Departement (Regierungsbezirk) entsprechend seiner Einwohnerzahl eine gewisse Anzahl Parlamentssitze zu. Nehmen wir an, die gebräuchliche Zuteilungsvorschrift, auf die ganze Nationalversammlung angewandt, weist der Stadt Paris 21 Sitze und dem (westlich angrenzenden) Departement Yvelines 12 Sitze zu. Wenn man nun dieselbe Vorschrift anwendet, um nur diese 33 Sitze auf die beiden Departements aufzuteilen, muss für dieses Teilproblem dasselbe Ergebnis, nämlich 21 Sitze für Paris und 12 für Yvelines, herauskommen. Denn wäre das Ergebnis – zum Beispiel – 22 Sitze für Paris und 11 für Yvelines, so könnte man diese Teillösung (22 und 11) anstelle der bisherigen (21 und 12) in die Gesamtzuteilung einsetzen und erhielte eine neue Zuteilung, die ebenso legitim wäre wie

Die Geometrie des gerechten Teilens

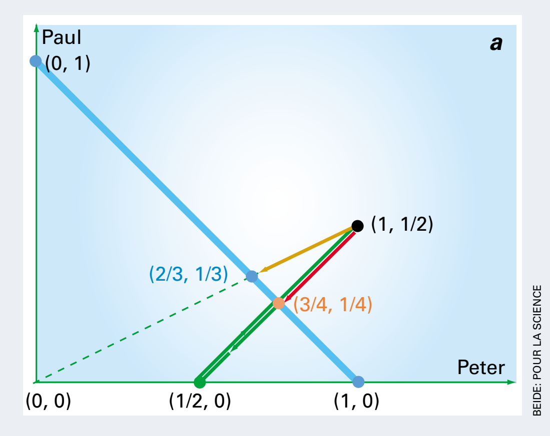
Peter und Paul erheben Anspruch auf ein teilbares Gut. Jeder Punkt auf der blauen Strecke entspricht einer möglichen Aufteilung.

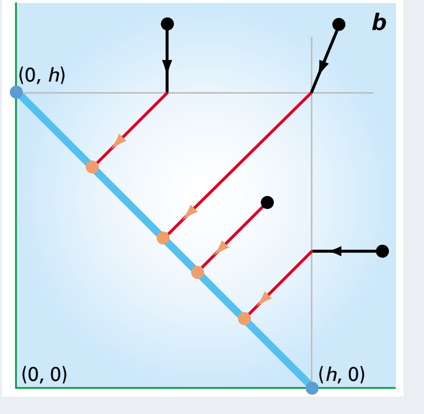
Im Fall *a* (linkes Bild) hat das Gut den Wert 1; Peter beansprucht das Ganze und Paul die Hälfte (schwarzer Punkt). Nach der Regel des umstrittenen Gewandes erhält Peter zunächst den Teil, der von Paul nicht beansprucht wird: Wir gehen vom schwarzen Punkt aus die grüne Linie entlang zum grünen Punkt (1/2, 0). Dann teilen wir den Rest unter beiden zu gleichen Teilen auf, das heißt, wir gehen die grüne Linie mit Steigung 1 (Steigungswinkel 45 Grad) aufwärts bis zur blauen Linie, was 3/4 für Peter und 1/4 für Paul ergibt (orangefarbener Punkt).

Nach der zweiten Erklärung für dieselbe Regel sollen beide den gleichen Verlust erleiden. Man geht daher vom schwarzen Punkt mit der Steigung 1 abwärts bis zur blauen Linie (roter Pfeil), was zum selben Ergebnis führt.

Nach Aristoteles ist die Aufteilung hingegen proportional zu den Forderungen: Vom schwarzen Punkt aus muss man in Richtung Ursprung (orangefarbener Weg) bis zur blauen Linie gehen; sie wird im blauen Punkt erreicht, und die Aufteilung ist 2/3 für Peter und 1/3 für Paul.

Im allgemeinen Fall (*b*; rechtes Bild) hat das Gut den Wert *h*. Die Regel des umstrittenen Gewandes ermittelt die Zuteilung für jedes Paar von Ansprüchen (schwarze Punkte): Man reduziere zunächst, wenn nötig, jeden Anspruch, der den Gesamtwert *h* übersteigt, auf *h*, das heißt man ersetze den schwarzen Punkt durch einen Punkt, dessen Koordinaten *h* nicht überschreiten (schwarze Pfeile). Im zweiten Schritt weise man jeder Partei den gleichen Verlust zu, indem man mit Steigung 1 abwärts bis zur blauen Linie wandert (rote Pfeile).





BEIDE: POUR LA SCIENCE

die alte. Das würde Begehrlichkeiten wecken, was die ganze Vorschrift mitsamt ihrem Anspruch auf Gerechtigkeit in Frage stellen würde.

Ein Problem besonderer Art ist die Zuweisung von Organen an transplantationsbedürftige Patienten. Sie läuft auf die Bestimmung einer Reihenfolge hinaus: Wer erhält das erste verfügbare Herz? Wer das zweite? Eine Vorschrift zur Bestimmung einer Reihenfolge ist kohärent, wenn sie, angewandt auf eine Teilmenge der Beteiligten, unter diesen dieselbe Reihenfolge ergibt wie zuvor (siehe unten und Kasten S. 95).

Die Tragweite des Kohärenzbegriffs wird noch deutlicher an einer anderen Lehre des Talmuds, die auf den ersten Blick völlig unverständlich erscheint.

Der Ehevertrag aus dem Talmud …

Das Traktat »Kethuboth« befasst sich mit Familienrecht und enthält insbesondere (im 10. Kapitel) Entscheidungen zu einem Fall, in dem drei Ehefrauen aus ihrem jeweiligen Ehevertrag (*kethuba*, Plural *kethuboth*) folgende Ansprüche haben: Der ersten sind 300 Geldeinheiten (»zuz«) zugesagt, der zweiten 200 und der dritten 100. Wir bezeichnen diese Zahlen als »Rechte« a_i der Frauen. Leider beträgt das Vermögen des Ehemannes bei seinem Tod weniger als 600. Wie soll man es aufteilen? Das Traktat »Kethuboth« bestimmt: Wenn das Vermögen des Mannes 100 ist, so bekommt jede Frau gleich viel, also 33 1/3; wenn es 300 ist, so sind die Anteile einer jeden proportional zu ihrem Recht, das heißt 150 für die erste, 100 für die zweite und 50 für die dritte; wenn es 200 ist, so bekommen die ersten beiden je 75 und die letzte 50 (Bild rechts oben).

Die Gleichverteilung und die proportionale Zuteilung wären, jeweils für sich genommen, ja einleuchtend; aber warum kommt das Traktat je nach Vermögenswert zu verschiedenen Ergebnissen? Wie kommt die seltsame Aufteilung der 200 zustande? Gibt es eine einzige Regel, die allen drei Entscheidungen zu Grunde liegt? Anders gesagt: Wie sähe die Aufteilung für jedes beliebige Vermögen zwischen 0 und 600 aus? Dieses Rätsel hat zwanzig Jahrhunderte lang Diskussionen genährt und wurde erst 1985 über den Umweg eines weit hergeholten Konzepts aus der Spieltheorie geklärt. Doch es geht auch einfacher: Das Prinzip der Kohärenz genügt, um das Geheimnis zu lüften. Wir werden sehen, dass die Entscheidungen des »Kethuboth« mit der Regel des umstrittenen Gewandes übereinstimmen.

Die Zuteilungsregeln des Kethuboth aus dem jüdischen Talmud. Ein Mann hat seinen drei Ehefrauen 300, 200 und 100 Geldeinheiten (»zuz«) vermacht. Wenn das Erbe nur 100 Einheiten wert ist, werden die Frauen zu gleichen Teilen bedacht; wenn es 300 Einheiten beträgt, werden sie proportional zu ihren Ansprüchen ausgezahlt. Bei einem Wert von 200 bestimmt das Kethuboth ohne nähere Begründung die Zuteilungen 75, 75 und 50. Rechts die prachtvoll ausgeschmückte *kethuba*, mit der 1793 in Rom die Ehe zwischen Abraham Hayyim ben Ephraim Modigliani und Rosa bat Menahem Modigliani besiegelt wurde.

PLS / SDW

Vermögen	Anspruch		
	300	200	100
100	33 ⅓	33 ⅓	33 ⅓
200	75	75	50
300	150	100	50



BEINECKE RARE BOOK AND MANUSCRIPT LIBRARY, YALE UNIVERSITY

Nehmen wir n Berechtigte mit einer Liste von Ansprüchen $a=(a_1, a_2, \ldots, a_n)$ an einem Gut mit Wert h, wobei die Summe der Ansprüche a_i über h hinausgehe, und sei $z=(z_1, z_2, \ldots, z_n)$ die (noch zu findende) Liste der entsprechenden Zuteilungen. Für die drei obigen Beispielprobleme sind die Rechte $a=(300, 200, 100)$, h nimmt die Werte 100, 200 und 300 an, und die Zuteilungen z sind (33 1/3, 33 1/3, 33 1/3), (75, 75, 50) und (150, 100, 50).

Die proportionale (aristotelische) Zuteilungsvorschrift ist für jede Liste von Ansprüchen a und alle Vermögen h einfach zu beschreiben: Jede Zuteilung z_i ist proportional ihrem zugehörigen Anspruch: $z_i = \lambda a_i$, wobei λ so gewählt ist, dass das gesamte Vermögen h verteilt wird. Für $a=(300, 200, 100)$ und $h=360$ ist $\lambda = 360/600$, und die Zuteilungen z betragen (180, 120, 60). Die proportionale Vorschrift ist offensichtlich kohärent: Jeder Teil einer proportionalen Zuteilung ist proportional. Das ist so einleuchtend, dass man gar nicht auf die Idee kommt, es könnte noch andere kohärente Vorschriften geben. So kommt es, dass wir seit Aristoteles »gerecht« und »proportional« für im Wesentlichen dasselbe halten.

Untersuchen wir die Entscheidungen aus dem Kethuboth auf Kohärenz, das heißt, fragen wir uns, wie je zwei der drei Frauen ihre zusammengenommenen Anteile unter sich aufteilen würden. Es stellt sich heraus, dass sie in jedem Einzelfall der Regel des umstrittenen Gewandes folgen.

- Wenn das Gesamterbe 100 beträgt, so ist der gemeinsame Anteil jedes Frauenpaares 66 2/3; da jede (mehr als) die ganze Summe verlangt, bestimmt die Regel des umstrittenen Gewandes, dass jede 33 1/3 erhält.
- Bei einem Gesamterbe von 200 haben die beiden ersten Frauen sich 150 zu teilen, jede verlangt (mehr als) die ganzen 150, also erhalten sie gleich viel; die erste und die dritte teilen sich 125, die erste verlangt alles, die dritte verlangt 100, beide erleiden einen Verlust von 50, wenn die erste 75 und die dritte 50 erhält; die gleiche Analyse ergibt sich für die letzten beiden Frauen.
- Für ein Gesamterbe von 300 wird der Leser feststellen, dass sich das Ergebnis auch hier für jedes der drei möglichen Frauenpaare auf die Regel des umstrittenen Gewandes zurückführen lässt.

… und seine moderne Formulierung

Auf diese Weise erklärt eine einzige, einfache Regel die Entscheidungen des Kethuboth zu den drei Erbfällen. Ist es möglich, für jedes Problem eine Zuteilung zu finden, die für jedes Paar von Berechtigten der Regel des umstrittenen Gewandes entspricht? Dies erscheint viel verlangt! Aber es ist möglich. ▷

Um das zu sehen, werfen wir zunächst einen genaueren Blick auf die Regel des umstrittenen Gewandes. Zwei Berechtigte, Peter und Paul, erheben die Ansprüche (a_1, a_2) auf ein Vermögen h, wobei a_1 größer sei als a_2. Welcher Art sind die Zuteilungen nach der Regel des umstrittenen Gewandes für alle Vermögen h zwischen 0 und $a_1 + a_2$ (Kasten unten)?

Wenn das Vermögen h kleiner ist als a_2, beansprucht jeder Bewerber das Ganze, und so teilen sie das Vermögen h zu gleichen Teilen auf; falls insbesondere das Vermögen h gleich a_2 ist, ergibt sich die Zuteilung $z = (a_2/2, a_2/2)$. Falls h größer ist als a_2, aber kleiner als a_1, gebührt jeder zusätzliche Euro Peter, da er weiterhin Anspruch auf das Ganze hat, Paul jedoch nicht auf mehr als a_2; insbesondere ist bei einem Vermögen $h = a_1$ die Zuteilung $(a_1 - a_2/2, a_2/2)$. Für die Werte von h schließlich, die größer als a_1 sind, teilen Peter und Paul sich alles, was über a_1 hinausgeht, wieder zu gleichen Teilen.

Die Kurve, welche die Regel des umstrittenen Gewandes beschreibt (Kasten unten), ist punktsymmetrisch: Man gewinnt ihr rechtes Teilstück zwischen $(a_1/2, a_2/2)$ und (a_1, a_2), indem man das linke Teilstück zwischen (0, 0) und $(a_1/2, a_2/2)$ um 180 Grad um den Punkt $(a_1/2, a_2/2)$ dreht. Also teilt die Regel des umstrittenen Gewandes die Verluste $(a_1 - z_1, a_2 - z_2)$ auf die gleiche Weise zu wie die Zuteilungen (z_1, z_2), und es genügt, die Zuteilungen für die Werte von h zwischen null und $(a_1 + a_2)/2$ zu berechnen, um sie für h zwischen $(a_1 + a_2)/2$ und $a_1 + a_2$ zu kennen.

Es ist nun einfach, die Lehre des Kethuboth in Formeln zu fassen: Für ein Vermögen h, das nicht größer ist als die Hälfte der Summe der Ansprüche, ist die Zuteilung an den i-ten Berechtigten $z_i = \min(\lambda, a_i/2)$, das heißt die kleinere der beiden Zahlen λ und $a_i/2$, wobei λ so gewählt ist, dass das Vermögen h vollständig aufgeteilt wird. Im Beispiel des Kethuboth ergibt sich $(z_1, z_2, z_3) = (\min(\lambda, 150), \min(\lambda, 100), \min(\lambda, 50))$. Für ein Vermögen von $h = 100$ gilt $\lambda = 33\ 1/3$, für $h = 200$ ist $\lambda = 75$, und $\lambda = 150$ ist der Faktor für das Vermögen 300. Wie vorher werden die Verluste genauso bestimmt wie die Zuteilungen, sodass die Zuteilungen bei größeren Vermögen h über Symmetrie ermittelt werden. So ergibt sich für $h = 400$ die Zuteilung $(300 - 75, 200 - 75, 100 - 50) = (225, 125, 50)$.

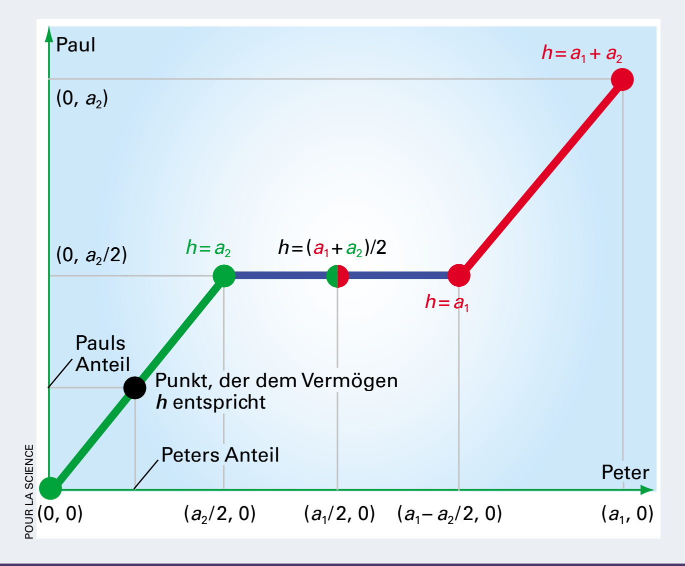
Diese Regel ist die einzige, mit der stets jedes Erbenpaar sein gemeinsames Erbe gemäß der Regel des umstrittenen Gewandes aufteilt. Und sie ist offensichtlich kohärent: Die Zuteilung an einen Beteiligten hängt nur von seinem individuellen Anspruch und einem Parameter ab, der allen gemeinsam ist.

Es gibt unendlich viele kohärente Zuteilungsregeln! Man kann die Kurve im Kasten unten durch eine andere ersetzen, welche die Punkte (0, 0) und (a_1, a_2) verbindet und stetig ist, das heißt keine Unterbrechungen aufweist. Außerdem muss die Zuteilungsfunktion $z_i(\lambda, a_i)$ schwach monoton in den beiden Argumenten λ und a_i sein; für die Kurve bedeutet das, dass sie auf ihrem Weg von (0, 0) nach (a_1, a_2) nicht unter ein einmal erreichtes Niveau absinken und sich nicht wieder nach links zurückwenden darf. Eine solche Kurve ergibt eine Zuteilungsvorschrift für zwei Personen. Ebenso wie die Regel des Aristoteles und die des umstrittenen Gewandes ist sie auf beliebig viele Personen verallgemeinerbar.

Allgemein gilt: Wenn eine Zuteilungsvorschrift stetig von den Ansprüchen abhängt (also nicht etwa nur Ansprüche über hundert Euro teilweise befriedigt und alle kleineren Ansprüche

Die Regel des umstrittenen Gewandes für alle Fälle

Jedem Punkt auf der (aus geraden Teilstücken bestehenden) Kurve entspricht ein gewisses Gesamtvermögen h. Die Ansprüche a_1 von Peter und a_2 von Paul sind vorgegeben, und wir nehmen an, dass a_1 größer ist als a_2. Wenn das Vermögen h klein ist, sind die Ansprüche von Peter und Paul beide größer als h; gemäß der Regel erhält jeder die Hälfte des Vermögens h (grünes Teilstück), bis zur Zuteilung $(a_2/2, a_2/2)$, bei der $h = a_2$ ist. Dann hört Paul auf, das ganze Vermögen h zu verlangen, und jeder zusätzliche Euro wird Peter zugesprochen (blaues Teilstück). Die Zuteilung ist also $(h - a_2/2, a_2/2)$, insbesondere $(a_1 - a_2/2, a_2/2)$ für $h = a_1$.



Sobald h größer wird als a_1, hört auch Peter auf, mehr als h zu fordern. Nach der Regel des umstrittenen Gewandes erhält Peter $(h + a_1 - a_2)/2$ und Paul $(h - a_1 + a_2)/2$, und zwar bis h gleich der Summe der Ansprüche $a_1 + a_2$ ist (rotes Teilstück). Die Kurve ist punktsymmetrisch um den Punkt $(a_1/2, a_2/2)$, was zeigt, dass die Verluste genauso verteilt sind wie die Zuteilungen. Wenn h kleiner ist als $(a_1 + a_2)/2$, sind die Zuteilungen z_1 und z_2 gegeben durch die Formel $(z_1, z_2) = (\min(\lambda, a_1/2), \min(\lambda, a_2/2))$, wobei λ so gewählt wird, dass das Vermögen h vollständig aufgeteilt wird, $z_1 + z_2 = h$; der Ausdruck $\min(a, b)$ steht für den kleineren (das »Minimum«) der beiden Werte a und b.

Beispiel: Das Vermögen sei $h = 9$ und die Ansprüche $a = (14, 6)$. Durch Probieren findet man $\lambda = 6$, was $(z_1, z_2) = (\min(6, 7), \min(6, 3)) = (6, 3)$ ergibt. Wenn h über $(a_1 + a_2)/2$ hinausgeht, geht man symmetrisch vor. So haben für $h = 11$ Peter und Paul zusammen einen Verlust von 9 zu tragen. Der wird genauso aufgeteilt wie oben das Vermögen von 9, also 6 für Peter und 3 für Paul, woraus sich die Zuteilung $(z_1, z_2) = (14 - 6, 6 - 3) = (8, 3)$ ergibt.

Wer bekommt die Niere?

Nehmen wir an, dass für die beiden Nieren eines bestimmten Spenders vier potenzielle Empfänger namens A, B, C und D in Frage kommen. Das amerikanische *United Network for Organ Sharing* weist ihnen zunächst Punkte zu, welche die medizinischen Erfolgsaussichten einer Transplantation ausdrücken, in diesem Fall 16, 21, 20, und 23. Hinzu kommt der Bonus, der die Wartezeit belohnt, nämlich zehn Punkte minus zehnmal den Bruchteil derjenigen, die bereits länger warten als der Kandidat selbst (oder genauso lange). In der Tabelle sind die Kandidaten nach Wartezeit geordnet: A hat am längsten warten müssen, D am kürzesten. Das ergibt die Boni 10, 7,5, 5 und 2,5.

Insgesamt ist das Ergebnis 26 für A, 28,5 für B, 25 für C und 25,5 für D. Die erste Niere wird demnach B zugesprochen, und wenn die Regel kohärent wäre, müsste die zweite Niere an A gehen. Wenn aber die Rangfolge der übrigen drei neu berechnet wird, wobei die medizinischen Punktzahlen unverändert bleiben, nicht aber die Boni, erhalten wir 26 für A, 26,67 für C und 26,33 für D, sodass jetzt C Erster wird: Er muss die zweite Niere erhalten! Die Reihenfolge für eine Teilmenge ist anders als für die Gesamtheit: Die Vorschrift ist nicht kohärent.

POUR LA SCIENCE

	A	B	C	D
Punktzahl	16	21	20	23
Bonus	10	7,5	5	2,5
zusammen	26	28,5	25	25,5

	A	C	D
Punktzahl	16	20	23
Bonus	10	6,67	3,33
zusammen	26	26,67	26,33

ignoriert), Beteiligten mit gleichen Ansprüchen stets gleiche Zuteilungen zuweist und das aufzuteilende Gut beliebig teilbar ist, dann folgt aus der Kohärenz bei Paaren die Kohärenz im Allgemeinen, wie wir das für die Teilungsregeln des Aristoteles und des Talmuds bereits festgestellt haben. Das heißt: Es ist stets möglich, eine Vorschrift für die Aufteilung eines Gutes zwischen zwei Personen auf beliebig viele Beteiligte zu erweitern! Diese Möglichkeit reduziert die Analyse der Gerechtigkeit unter vielen auf das wesentlich einfachere Problem der Gerechtigkeit unter zweien.

Übrigens gibt es ein wohl bekanntes Beispiel für eine kohärente Zuteilungsfunktion: den Einkommensteuertarif. Dabei ist a das zu versteuernde Bruttoeinkommen und z die zu zahlende Einkommensteuer, und eigentlich sind beide mit dem negativen Vorzeichen zu versehen, weil es hier nicht um die Zuteilung von Vorteilen, sondern von Nachteilen geht.

Die steuerliche Zuteilungsfunktion ist monoton (wer mehr verdient, muss mehr zahlen oder jedenfalls nicht weniger) und bis auf Rundungsfehler stetig (ein kleiner Unterschied im Einkommen macht nur einen kleinen Unterschied in der Steuer). Von Zeit zu Zeit werden die Parameter der Funktion (entsprechend dem λ in obiger Diskussion) so angepasst, dass die Summe der gezahlten Steuern dem Betrag entspricht, den der Staat zu benötigen glaubt. Aber von dieser für alle gültigen Korrektur abgesehen hängt meine Steuer nicht davon ab, was mein Nachbar zu zahlen hat. In diesem Sinne ist der Einkommensteuertarif kohärent.

Sind denn die in der Praxis verwendeten Regeln alle kohärent? Keineswegs! Bei der Transplantation von Organen – mittlerweile ein chirurgischer Routineeingriff – übertrifft die Nachfrage das Angebot gewöhnlich bei weitem. Wie stellt man eine Rangliste der Kranken, die auf ein Spenderorgan warten, auf? In den Vereinigten Staaten ist zu diesem Zweck das *United Network for Organ Sharing* (Unos) gegründet worden. Seine Politik ist es, »bei der Zuteilung der Organe ein nichtdiskriminierendes, gerechtes und ausgewogenes System« zu praktizieren. Auf seiner Internetseite www.unos.org stand am 9. Januar 2004, dass 89117 Kranke auf ein Organ warteten, darunter 59544 auf eine Niere.

Organtransplantationen

Der Erfolg einer Nierentransplantation hängt von verschiedenen Eigenschaften von Spender und Empfänger ab: Größe des Organs, immunologische Eigenschaften, Blutgruppe und andere. Das Ranglistensystem des Unos bezieht sich auf diese und weitere Faktoren: Für eine verfügbare Niere werden allen potenziellen Empfängern Punkte für jeden Faktor zugeordnet, und der Empfänger mit der höchsten Punktzahl bekommt die Niere als erster angeboten. Das Ziel des Systems ist es, den Erfolg einer Transplantation zu sichern, ohne dabei die Kranken mit selten vorkommenden Eigenschaften zu benachteiligen, und denjenigen Priorität einzuräumen, die den dringendsten Bedarf haben.

Zum Beispiel werden einem Patienten angerechnet: zwei Punkte für jede der sechs möglichen Übereinstimmungen zwischen HLA-Antigenen (Gewebeverträglichkeitsmerkmalen), zehn Punkte, wenn er keinen Zugang zur Dialyse hat, ein Punkt für jede zehn Prozent der Bevölkerung, deren Eigenschaften mit den seinen inkompatibel sind, und – ein Bonus, um das Schicksal einer langen Wartezeit auszugleichen – zehn Punkte minus zehnmal den Bruchteil der Wartenden, die schon länger warten als er selbst. Leider ist die Regel nicht kohärent (Kasten oben): Vier Kranke stehen für eine bestimmte Niere in der Rangfolge B, A, D, C; aber nachdem B eine Niere erhalten hat, kehrt sich die Reihenfolge der übrigen um: C, D und als letzter A!

Die Inkohärenz des von Unos verwendeten Punktesystems entsteht durch die Bonuspunkte: Sie werden von der Gesamtheit der Patienten in der Warteschleife bestimmt, also von einem Faktor, der anders als die übrigen nicht nur vom Kandidaten selbst abhängt. Ein Patient weniger in der Schlange ändert die Bonuspunkte und kann dadurch die Rangliste der übrigen umdrehen.

Kohärenz bei unteilbaren Gütern zu erreichen ist zwar schwierig, aber keineswegs unmöglich. Nehmen wir das Problem, die 570 Sitze des französischen Parlaments, der *Assemblée Nationale*, auf ▷

Das Kohärenzprinzip, angewandt auf den Deutschen Bundestag

Von Friedrich Pukelsheim

Bei der jetzigen Sitzzuteilungsmethode für den Bundestag sind es besonders die Überhangmandate, die die Kohärenz stören. So hat nach dem Wahlergebnis von 2002 die SPD für 18 488 668 Zweitstimmen bei vier Überhangmandaten 251 Sitze und die CDU für 14 167 561 Zweitstimmen bei einem Überhangmandat 190 Sitze; eine Zuteilung dieser 441 Sitze nur zwischen SPD und CDU ergäbe aber 250 Sitze für die SPD und 191 Sitze für die CDU. Die Tabelle illustriert eine Variante der im Artikel beschriebenen alternativen Methode, deren Ergebnisse immer kohärent sind.

An die Stelle der Regel, dass jedem Departement mindestens ein Sitz in der Regionalversammlung zusteht, tritt die Vorschrift, dass jede Partei mindestens so viele Sitze erhalten muss, wie sie Direktmandate gewonnen hat. Das bringt die deutsche Spezialität der verbundenen Personen- und Verhältniswahl mit dem Prinzip der Kohärenz in Einklang.

Die Einträge in der Tabelle sind von der Form $p \vee \langle q/\lambda \rangle$. Dabei ist p die Anzahl der mit den Erststimmen gewonnenen Direktmandate. Der Eintrag $\langle q/\lambda \rangle$ sind die Verhältniswahlmandate: Die Zweitstimmen q werden durch den jeweiligen Divisor λ geteilt; die spitzen Klammern bedeuten, dass der Quotient q/λ zur nächsten ganzen Zahl zu runden ist. Die größere der beiden Zahlen, durch das Zeichen $\vee$ ausgedrückt, ist die Sitzzuteilung; $a \vee b$ ist also eine Kurzschreibweise für max(a, b).

Bei der Bundes-SPD besagt $171 \vee 247 = 247$, dass sie mit den Erststimmen 171 Direktmandate gewonnen hat und ihre Zweitstimmen 247 Verhältniswahlmandate ergeben; die größere dieser Zahlen (247) ist ihre Sitzzahl. Zur Berechnung der Verhältniswahlmandate werden die Zweitstimmen (18 488 668) durch den angegebenen Divisor (75 000) geteilt und das Ergebnis (246,52) standardmäßig gerundet (247). Die PDS hat zwei Direktmandate, aber keine verrechenbaren Zweitstimmen gewonnen; ihr werden $2 \vee 0 = 2$ Sitze zugeteilt.

Die Unterzuteilungen an die Landeslisten erfolgen nach derselben Methode; die Divisoren sind in der letzten Zeile ausgewiesen. Zum Beispiel kommt in der ersten (SPD-)Spalte auf 76 000 Zweitstimmen jeweils rund ein Verhältniswahlmandat. Dort, wo sonst Überhangmandate entstünden, dominieren die Direktmandatsgewinne (Hamburg, Bremen, Sachsen-Anhalt, Thüringen), fünfmal sind Personen- und Verhältniswahlmandate ausgeglichen (Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Bremen, Berlin, Saarland), in den übrigen Ländern wird die Zuteilung von der Verhältnisrechnung bestimmt.

In Klammern stehen die Zahlen für die heute gültige Sitzverteilung, soweit sie von der hier berechneten Verteilung abweicht.

Die direktmandatsbedingte Divisormethode mit Standardrundung ist kohärent: Für je zwei Beteiligte sind die Sitzzahlen, die aus den jeweils verfügbaren Sitzen herausgerechnet werden, so aufgeteilt, als würden die zwei ihren gemeinsamen Sitzgewinn nur untereinander verrechnen. Diese Methode kennt keine Überhangmandate, keine doppelten Stimmerfolge und keine Stimmgewichtsumkehr, die an dem im Bundeswahlgesetz derzeit vorgeschriebenen Verfahren irritieren (Spektrum der Wissenschaft 2/1999, S. 70).

	SPD	CDU	CSU	GRÜNE	FDP	PDS
Oberzuteilung von 598 (603) Mandaten an die Parteien (Divisor = 75 000)						
Bund	18 488 668	14 167 561	4 315 080	4 110 355	3 538 815	0
	171∨247 = 247 **(251)**	82∨189 = 189 **(190)**	43∨58 = 58	1∨55 = 55	0∨47 = 47	2∨0 = 2
Unterzuteilungen an die Landeslisten						
Schleswig-	743 838	625 100		162 425	139 417	
Holstein	10∨10 = 10	1∨8 = 8		0∨2 = 2	0∨2 = 2	
Mecklenburg-	405 415	294 746		34 180	52 816	
Vorpommern	5∨5 = 5	2∨4 = 4		0∨0 = 0	0∨1 = 1	
Hamburg	404 738	270 318		156 010	65 574	
	6∨5 = 6	0∨4 = 4		0∨2 = 2	0∨1 = 1	
Niedersachsen	2 318 625	1 673 495		353 644	342 990	
	25∨31 = 31	4∨22 = 22		0∨5 = 5	0∨5 = 5	
Bremen	183 368	92 774		56 632	25 306	
	2∨2 = 2	0∨1 = 1		0∨1 = 1	0∨0 = 0	
Brandenburg	707 871	339 868		68 765	88 685	
	10∨9 = 10	0∨4 = 4		0∨1 = 1	0∨1 = 1	
Sachsen-	618 016	415 486		48 574	108 267	
Anhalt	10∨8 = 10	0∨5 = 5 **(6)**		0∨1 = 1	0∨1 = 1	
Berlin	685 170	484 017		274 008	124 004	0
	9∨9 = 9	0∨6 = 6		1∨4 = 4	0∨2 = 2	2∨0 = 2
Nordrhein-	4 499 388	3 675 732		930 684	978 841	
Westfalen	45∨59 = 59 **(60)**	19∨49 = 49		0∨12 = 12	0∨13 = 13	
Sachsen	861 685	868 167		119 530	187 759	
	4∨11 = 11 **(12)**	13∨11 = 13		0∨2 = 2	0∨2 = 2	
Hessen	1 355 496	1 266 054		366 032	280 927	
	17∨18 = 18	4∨17 = 17		0∨5 = 5	0∨4 = 4	
Thüringen	578 726	426 162		61 799	84 882	
	9∨8 = 9	1∨6 = 6		0∨1 = 1	0∨1 = 1	
Rheinland-	918 736	967 011		190 645	223 761	
Pfalz	7∨12 = 12	8∨13 = 13		0∨2 = 2	0∨3 = 3	
Bayern	1 922 551		4 315 080	562 483	332 675	
	1∨25 = 25 **(26)**		43∨58 = 58	0∨7 = 7	0∨4 = 4	
Baden-	1 989 524	2 543 789		676 342	461 801	
Württemberg	7∨26 = 26 **(27)**	30∨34 = 34		0∨9 = 9	0∨6 = 6	
Saarland	295 521	224 842		48 602	41 110	
	4∨4 = 4	0∨3 = 3		0∨1 = 1	0∨1 = 1	
Divisor	76 000	75 700	75 000	77 000	76 000	

Der Autor ist Professor für Mathematik an der Universität Augsburg.

die Departements aufzuteilen, und zwar so, dass die von der Verfassung vorgeschriebene Gleichheit aller Bürger gewährleistet ist.

Nach unserem Satz von der Verallgemeinerbarkeit der Vorschriften brauchen wir nur eine Regel, die eine beliebige Anzahl von Sitzen zwischen zwei Departements mit beliebigen Bevölkerungszahlen aufteilt. Zum Beispiel hat das Departement Bouches-du-Rhône nach der letzten Volkszählung 1835719 Einwohner, das Departement Haute-Vienne 353893, und zurzeit haben beide Departements zusammen zwanzig Abgeordnete. Um die »Gleichheit« der Einwohner zu garantieren, müsste man jedem der beiden Departements eine Anzahl von Sitzen zuteilen, die seinem Anteil an der Bevölkerung proportional ist, also 16,768 für Bouches-du-Rhône und 3,232 für Haute-Vienne. Doch ein Abgeordneter ist unteilbar! Die beste Näherung an die Gleichheit wäre offensichtlich, Bouches-du-Rhône 17 Abgeordnete und Haute-Vienne drei Abgeordnete zuzuteilen: Das heißt, der proportionale Anteil wird zur nächstgelegenen ganzen Zahl gerundet (die derzeitige Aufteilung in der Assemblée Nationale ist 16 und 4).

Diese Vorschrift ist klar, nahe liegend und eindeutig, es sei denn, die beiden Reste sind genau gleich 0,5 (was höchst unwahrscheinlich ist!). Es kommt allerdings vor, dass der Anteil eines Departements (wie Lozère) wegen seiner geringen Einwohnerzahl kleiner als 0,5 ist, sodass diese Regel ihm gar keinen Abgeordneten zugestehen würde. Der Gesetzgeber kann dann die Regel dahingehend ändern, dass jedes Departement mindestens einen Sitz erhält.

Kohärente Repräsentation

So wären die Sitze im Regionalrat der Region Provence-Alpes-Côte d´Azur den einzelnen Departements zuzuteilen. In der ersten Spalte die Einwohnerzahlen nach der Volkszählung von 1999, in den übrigen Spalten die Sitzzuteilung nach der Methode von Sainte-Laguë gemäß der im Text erklärten Formel. Beispiel: Für $\lambda = 36700$ (vorletzte Spalte) rechnet man: $\langle 1835719/36700 \rangle = \langle 50{,}020 \rangle = 50$; $\langle 898441/36700 \rangle = \langle 24{,}481 = 24$ und so weiter. Dieser Wert von λ ergibt die vorgeschriebene Gesamtzahl Abgeordneter. In der letzten Spalte die zurzeit gültige Zuteilung.



POUR LA SCIENCE

	Bevölkerung	$\lambda > 90851$	$90851 > \lambda > 89548$	$45326 > \lambda > 44948$	$36775 > \lambda > 36672$	aktuell
Bouches-du-Rhône	1835719	1	20	41	50	49
Alpes-Maritimes	1011326	1	11	22	28	28
Var	898441	1	10	20	24	23
Vaucluse	499685	1	6	11	14	14
Alpes de Hte. Prov.	139561	1	2	3	4	5
Hautes-Alpes	121419	1	1	3	3	4
zusammen	4506151	6	50	100	123	123

Kohärenz für Parlamentssitze

Es ist nun eine einfache Sache, eine allgemeine, kohärente Regel für beliebig viele Departements aufzustellen, bei der jedes Paar gemäß der Proportionalitätsregel mit Standardrundung geteilt wird. Man erhält genau die Regel, die der Mathematiker André Sainte-Laguë (1882–1950) vorgeschlagen hat: Das Departement i, das a_i Einwohner hat, erhält $\max(1, \langle a_i/\lambda \rangle)$ Sitze, wobei λ so gewählt ist, dass alle Sitze verteilt werden. Die spitzen Klammern $\langle \ldots \rangle$ bedeuten, dass zur nächst gelegenen ganzen Zahl zu runden ist, und das Maximum »max« ist der größere der beiden Werte, die in der Klammer stehen. Die Maximumsformel garantiert jedem Departement mindestens einen Abgeordneten. Wenn λ sehr groß ist, dann ist jeder Quotient sehr klein, sodass jedem Departement nur ein einziger Abgeordneter zugeteilt wird. Wenn man den Wert von λ verkleinert, werden die Quotienten größer; sobald einer 1,5 übersteigt, springt sein gerundeter Wert von 1 auf 2, und so weiter. Für jede Gesamtzahl h von Abgeordneten gibt es mehrere geeignete Werte von λ, denn wenn man λ nur ein bisschen variiert, verändert sich noch keiner der gerundeten Werte. Erst wenn durch weiteres Absenken von λ einer der Quotienten die Schwelle »ganze Zahl plus 1/2« überschreitet, wird h um eins größer.

Offenbar ist die kohärente Methode von Sainte-Laguë die bestmögliche, um die Sitze der Assemblée Nationale und die der Regionalräte zu verteilen. Leider wird sie nicht angewendet, sodass das Gleichheitsversprechen der Verfassung ohne Not missachtet wird.

Fazit: Das Prinzip der Proportionalität ist gut; aber es schafft Gerechtigkeit nur an der Oberfläche. Wichtiger ist das tiefer liegende Gleichheitsprinzip der Kohärenz. Dieses wird in der Praxis nicht durchgehend befolgt. Dabei ist seine Anwendung einfach. Es genügt, eine klare Vorstellung von einer gerechten Aufteilung unter zwei Parteien zu haben; und schon gewinnt man eine allgemeine und gerechte Regel für die Zuweisung von Besitztümern, Einkommensteuern und Organen an beliebig viele Berechtigte. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



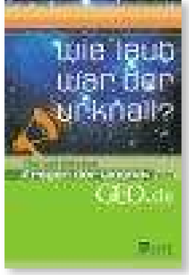
Michel Balinski ist seit 1989 Professor für Wirtschaftswissenschaften an der École Polytechnique in Paris. Seine Forschungsarbeiten befassen sich mit diskreter Optimierung und vor allem mit Wahlverfahren.

Fair representation: meeting the ideal of one man, one vote. Von Michel Balinski und H. P. Young. Yale University Press, 1982; zweite Auflage, Brookings Institution Press, 2001

Equity in theory and practice. Von H. P. Young. Princeton University Press, 1994

Game theoretic analysis of a bankruptcy problem from the Talmud. Von R. J. Aumann und M. Maschler in: Journal of Economic Theory, Bd. 36, S. 195, 1985

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



ALLGEMEINWISSEN

Peter-Matthias Gaede und Jens Rehländer (Hg.)

Wie laut war der Urknall?

Die schönsten »Fragen der Woche« von Geo.de

Rowohlt, Berlin 2003. 160 Seiten, € 14,90

Als ich zum letzten Mal innerhalb einer einzigen Stunde so viel gelernt habe wie beim Durchblättern von »Wie laut war der Urknall?«, muss ich noch sehr jung gewesen sein. Nun weiß ich, warum die Zugspitze vom Süden aus betrachtet 25 Zentimeter höher ist als aus nördlicher Sicht. Ich habe eine Vorstellung davon, was passieren würde, wenn man einen Stein durch einen Tunnel wirft, der genau durch den Mittelpunkt der Erde von Pol zu Pol führt. Und ich bin um die Erkenntnis reicher, dass im Regenwald niemand an Heuschnupfen leiden muss, obwohl es dort von Pollen und Blüten nur so wimmelt.

Das Buch ist eine Zusammenstellung der schönsten »Fragen der Woche«, die das Magazin »Geo« den Lesern auf seinen Internetseiten zum Kniffeln gibt. Jeden Mittwoch gibt es eine neue Frage, und dann kann, wer meint, eine Antwort zu wissen, diese in ein öffentliches Forum zur Debatte stellen. Nach einer Woche oft hitziger Diskussionen gibt es die Auflösung. Und die hat der »Geo«-Redaktion schon oft Kopfzerbrechen bereitet. Ein einfacher Blick ins Lexikon reicht nicht aus, um zu erklären, woher die Quarks ihren Namen haben oder was die härteste Substanz im menschlichen Körper ist.

Zwischen »14 Fragen rund um Geburt, Körper und Gene« und »10 Fragen zu Vergänglichkeit und Tod« finden alle wichtigen Belange unserer Existenz Beachtung. Die Antworten zu den Themen »Essen und Gefressenwerden« oder »Fortpflanzung« stopfen klaffende Wissenslücken, deren Existenz man bislang nicht einmal erahnte.

Am Ende jedes Kapitels nimmt ein komprimierter Wissensartikel den Leser mit auf eine Reise vom Großen ins Kleine. So lernen wir über das Leben in extremen Temperaturen, dass der urzeitlichen Mikrobe *Pyrolobus fumarii* auch 350 Grad heißes Wasser keinen Schaden antun kann, während ein Bärentierchen zumindest noch acht Stunden in –269 Grad kaltem flüssigem Helium überlebt. Oder vom Kleinen ins Große: Über die innere Uhr des Menschen erfahren wir, dass Gehirnströme im 0,1-Sekunden-Takt schwingen und die Abwehrkräfte des menschlichen Körpers und sein Schlafbedürfnis in einem Zyklus von 365 Tagen oszillieren.

Für die Veröffentlichung in Buchform wurden die Antworten noch einmal neu recherchiert und erweitert. Dass sie dennoch nicht der Weisheit letzter Schluss sein müssen, ist den Redakteuren durchaus bewusst. Deshalb bieten sie zur Fortsetzung der Diskussion die Internetseite www.geo.de/urknall an. »Wir haben ganz schön geschwitzt bei der Vorstellung, dass unsere Leser schlauer sein könnten als wir«, erzählt der »Geo«-Redakteur und Mitherausgeber Jens Rehländer. »Aber bislang haben weder Leser noch Wissenschaftler unsere Antworten in Frage gestellt.«

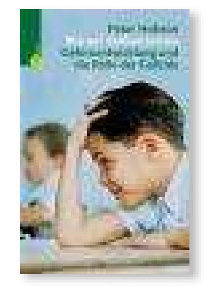
Langeweile kommt beim Lesen nicht auf. Eher fährt einem der Bus davon, oder die Milch kocht über, weil man so dringend erfahren möchte, warum Fledermäusen selbst bei ihrem fünf- bis sechsmonatigen Winterschlaf das Blut nicht zu Kopfe steigt.

»Wie laut war der Urknall?« ist weniger ein Lese- als vielmehr ein Stöberbuch. Ein ideales Geschenk für Kinder (auch die ganz großen), die gerne staunen und neugierig sind auf die Welt; die nicht minder neugierigen Eltern können es dann heimlich auch lesen.

Schade ist nur, dass die Gestaltung des Buchs mit einer lieblosen Grafik auf dem Einband und willkürlich zusammengesuchten Illustrationen nicht gerade zum Reinschauen animiert. Es ist bezeichnend, dass der Verlag sich auf der ersten Seite dafür entschuldigen muss, nicht alle Bildrechteinhaber um Druckerlaubnis gefragt zu haben. Trotzdem: ein Buch, das Spaß macht. Die Risiken und Nebenwirkungen bestehen im Wesentlichen darin, dass Kinder zu »Besserwissern« oder »Neunmalklugen« werden könnten.

Angelika Franz

Die Rezensentin ist promovierte Archäologin und Redakteurin bei »Abenteuer Archäologie« in Heidelberg.



HIRNFORSCHUNG

Peter Hobson

Wie wir denken lernen

Gehirnentwicklung und die Rolle der Gefühle

Aus dem Englischen von Christoph Trunk.
Walter, Düsseldorf 2003. 267 Seiten, € 29,90

Noch vor wenigen Jahren konnten sich Gehirnforscher wie Joseph LeDoux und Antonio Damasio etwas darauf zugute halten, ein bis dahin völlig vernachlässigtes Gebiet neu zu erkunden: die Rolle der Gefühle für die menschliche Verhaltenssteuerung. Jahrzehntelang war Kognitionsforschung die Ergründung rationalen Denkens gewesen; Gefühle hatte man als den störenden, irrationalen Sumpf in den Untergrund verbannt. Das hat sich mittlerweile völlig geändert. LeDoux (»Das Netz der Gefühle«) hat Emotionspsychologie und Neurobiologie in Einklang gebracht, Damasio (»Descartes' Irrtum«) dargelegt, dass wir gar nicht anders entscheiden können als »aus dem Bauch heraus«. Und nun geht Peter Hobson daran, unser Denken endgültig und buchstäblich vom Kopf auf die Füße zu stellen: Nur dank der Gefühle sei der Mensch zum symbolischen und kreativen Denken in der Lage.

Vom ersten Schrei an strebt ein Kind danach, mit anderen Menschen in Beziehung zu treten. Es sucht Blickkontakt, ahmt nach und erkennt den emotionalen Gesichtsausdruck seines Gegenübers. So entsteht »primäre Intersubjektivität«: ein inniger Einklang und fein abgestimmter emotionaler Austausch zwischen Bezugsperson und Kind. Maßgeblich ist dabei, dass das Kind willens und fähig ist, sich in den anderen einzufühlen.

Im Alter von etwa einem Jahr erweitert sich dieser Prozess zur »sekundären Intersubjektivität«: Das Kind sucht den Austausch über etwas Drittes. Es erfasst die Haltung, die ein anderer gegenüber Dingen und Erfahrungen einnimmt – ▷

wie die Angst der Mutter vor Schlangen oder die Neigung eines Spielgefährten zu seinem Lieblingsteddy – und kann sie für sein eigenes Verhalten berücksichtigen. Solche »Einstellungen zu etwas« fallen für Hobson unter »Emotionen«, eine Klassifizierung, die gewöhnungsbedürftig, aber durchaus üblich und sinnvoll ist.

Wenn das Kind dann begriffen hat, dass es mehrere Perspektiven – zum Beispiel eine eigene und eine fremde – auf dasselbe Ding gibt, und zwischen ihnen wechseln kann, ist es nur noch ein kleiner Schritt dahin, ein Ding mal als es selbst, mal als etwas anderes zu betrachten – also zum Symbolgebrauch. Das Kind nimmt eine Kiste und tut so, als wäre es ein Auto: Es nimmt also gleichzeitig zwei unterschiedliche Haltungen zu der Kiste ein. Nahtlos schließt sich an solches Symbolspiel die höchste Form des Symbolgebrauchs an, die menschliche Sprache. Aus der emotionalen Einfühlung ist rationales Denken geworden.

Wir unterstellen im täglichen Umgang miteinander stets den freien Willen – ob es ihn gibt oder nicht

Wie Hobson diese Theorie entwickelt und anhand zahlreicher Untersuchungen untermauert, ist – trotz einiger Wiederholungen – höchst spannend zu lesen. Hobson ist als Professor für Psychopathologie in London zugleich Experimentalpsychologe, Psychiater und ausgebildeter Psychoanalytiker. Über alle drei Disziplinen hat er sich seit langem dem Phänomen des Autismus angenähert, das ihm für seine Theorie als natürliches Läsionsexperiment dient: Man beobachte, wie sich das Denken bei Menschen entwickelt, denen von Geburt an die Fähigkeit fehlt, andere Menschen als fühlende Wesen zu erfahren. Tatsächlich zeigen autistische Kinder nie Symbolspiel und haben Schwierigkeiten mit dem Sprechenlernen. Ähnliche Störungen bilden sich überdurchschnittlich häufig auch bei blinden Kindern heraus, die ja ebenfalls daran gehindert sind, die Gefühle anderer Menschen und den Gegenstand von deren Aufmerksamkeit wahrzunehmen.

Hobsons Theorie kann nicht alle Symptome des Autismus erklären, etwa das stereotype Verhalten und die charakteristischen Wahrnehmungsstörungen. Man vermisst auch eine Erklärung, warum Autisten, ohne angeblich Symbole verstehen zu können, trotzdem oft sprechen lernen. Aber Autismus ist auch nur ein Nebenthema des vorliegenden Buchs.

Leider kommt die Gehirnentwicklung, die der deutsche Verlag vollmundig in den Titel genommen hat, überhaupt nicht vor. Dem Autor ist das nicht vorzuwerfen; das Buch ist, so wie es steht, vollständig. Aber interessiert hätte es einen doch, welche Schäden im Nervensystem so spezifisch diese scheinbar komplexe Fähigkeit, Menschen als Menschen wahrzunehmen, verhindern. Zumal dieses Wissen zugleich aufklären könnte, wie gesunde Menschen diese Leistung vollbringen. Spielen vielleicht die von Vittorio Gallese entdeckten »Spiegelneuronen« eine Rolle, jene Nervenzellen, die gleichermaßen feuern, wenn ein Affe eine Bewegung selbst ausführt, wie wenn er sie beobachtet?

Auf der Einfühlung in Mitmenschen, die ja stets eine Zuschreibung von Eigenschaften und Zuständen ist, basieren verschiedene Begriffe der Philosophie:

- Subjektivität: Hobson legt dar, dass ein gesundes Kleinkind Menschen von vornherein als eine Einheit aus Körper und Bewusstsein erlebt und nicht etwa als »Dinge«, von denen es später erfährt, dass sie auch Bewusstsein haben.
- der freie Wille, den wir, wie Peter Strawson gezeigt hat (»Freiheit und Übelnehmen«), im menschlichen Umgang notwendig unterstellen, ganz gleich, ob es ihn wirklich gibt, und
- die Individualität eines Lebewesens, die es für uns moralisch bedeutsam macht.

Andere als Menschen wahrzunehmen und zu behandeln heißt, ihnen Subjektivität, freien Willen, Individualität zuzuschreiben. Es wäre spannend zu ergründen, wie das geschieht.

Auch für eine Theorie des Selbst, wie sie Damasio entwickelt hat, könnte Hobsons Theorie relevant sein. Autisten verfügen über ein Selbstkonzept, insofern es um die Repräsentation eines »Ich« in Raum und Zeit geht. Ein reiches, vollwertiges Selbst aber bildet sich erst in den vielfältigen Beziehungen zu anderen Menschen heraus, die Autisten fehlen. Das Selbst, ebenso wie das Denken, ist, wie Hobson betont, keine Eigenschaft des einzelnen Gehirns, sondern ein soziales Phänomen. Es gehört zu den großen Leistungen dieses anregenden Buchs, diesen vernachlässigten Aspekt in das Blickfeld von Gehirnforschern gerückt zu haben. Möglicherweise ist das der neue Trend, der in zehn Jahren ebenso Mode sein wird wie heute die Gefühle.

Konrad Lehmann

Der Rezensent ist promovierter Neuroanatom und arbeitet an der Universität Bielefeld über die Entwicklung der Gehirnstruktur von Säugetieren.



ZOOLOGIE

Jean-François Hellio und Nicolas van Ingen (Bilder), Philippe und Guillemette de Grissac (Texte)

Die verborgene Welt der Vögel

Aus dem Französischen von Marion Pausch.
Franckh-Kosmos, Stuttgart 2002. 176 Seiten, € 34,90

Wer die Flugkünste der Vögel bewundern möchte, schaue nur in den Himmel. Und wer sich an ihrem Gesang erfreuen will, öffne im Frühjahr einfach das Fenster. Wer allerdings in die »verborgene Welt der Vögel« eindringen und seine Entdeckungen auch noch im Bild festhalten will, der darf wie die Fotografen dieses Buchs weder Kosten noch Mühen scheuen und muss zudem über schier endlose Geduld verfügen.

Jean-François Hellio und Nicolas van Ingen zählen zu den renommiertesten Naturfotografen Frankreichs. In über zwanzigjähriger Erfahrung haben sie gelernt, dass ein guter Schnappschuss oftmals viele Stunden in unbequemer Position erfordert – in eisiger Winternacht oder an einem glühend heißen Sommertag. Außergewöhnliche Fotos erhält man eben nur dann, wenn man am richtigen Ort im perfekten Augenblick auf den Auslöser drückt.

Oftmals kommen Hellio und van Ingen ihren Motiven nicht nur mit dem Objektiv auf geradezu spektakuläre Weise nahe. Dann entstehen Aufnahmen, die nicht nur fotografisch, sondern auch wissenschaftlich einzigartige Leistungen



Die Bienenfresser (hier in der Bucht von Audierne in der Bretagne) pflegen ein besonders zärtliches Balzritual. »Bis das Weibchen seine Eier legt, versäumen sie keine Gelegenheit, einander kleine Geschenke zu machen. Libellen, Bremsen und Bienen wandern von einem Schnabel zum anderen, selbst im Augenblick der Paarung.«



sind, Momentaufnahmen, die etwas von der verborgenen Welt der Vögel verraten und darüber hinaus vom Glück des menschlichen Beobachters und der Intensität seines Naturerlebnisses.

Ein solches Dokument ist jene Fotoserie, die Hellio und van Ingen an einem vereisten Bach in Frankreich gelang: Ein Rotkehlchen und eine Amsel beobachten einen Eisvogel bei der Jagd und beginnen schließlich selbst damit, an jenem Eisloch kleine Fische zu fangen. Von unerbittlicher Kälte zeugt auch jene Aufnahme, die eine Wasserralle zeigt, die einen im Schnee liegenden Amselkadaver anpickt.

Ganz andere Nöte dokumentieren jene Fotos von Zugvögeln, die völlig erschöpft an der Küste von El Memghar (Mauretanien) gestrandet sind: etwa jener Wespenbussard, der sich mit letzter Kraft noch aus dem Wasser an den Sand ziehen kann, bevor er an Entkräftung stirbt. Oder jene Pfuhlschnepfe, die sich kaum mehr auf den Beinen zu halten vermag und daher ihre Flügel quasi als Krücken zur Fortbewegung nutzt. Ein Goldschakal trägt die leichte Beute schließlich davon.

Doch neben solch dramatischen Szenen des Überlebenskampfes bietet auch dieses Vogelbuch jene wohlbekannten Idyllen bunten Vogellebens: etwa den »Pinguintanz« (das auffällige Balzritual) der Haubentaucher, den Flug der Singschwäne, das Turnier der Kampfläufer, die Hochzeit der Bienenfresser (Bilder) oder das im mütterlichen Rückengefieder eingekuschelte Höckerschwanküken.

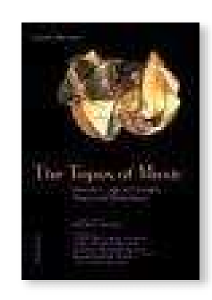
Der Bildband behandelt die Themen Balz (»Zeit für die Liebe«), Brut und Jungenaufzucht (»Vom Ei zum Vogel«), Nahrungsbeschaffung (»Jäger und Fischer«), Vogelzug (»Die große Reise«) sowie Vögel als Anpassungskünstler (»Fit für das Leben«). Das abschließende Kapitel »Seltene Vögel« versammelt Aufnahmen von Raritäten wie Schneeeule, Großtrappe oder Gelbschnabeltaucher. Neben dem Register der abgelichteten Arten enthält der Anhang noch einige Literatur- und Beobachtungstipps sowie Adressenhinweise auf Vogelwarten und Vogelschutzverbände.

Die Begleittexte dieses »Vogelalbums« schrieb das Ehepaar Philippe und Guillemette de Grissac. Jedes Kapitel beginnt mit einigen allgemeinen Bemerkungen zur Biologie der Vögel, bevor es auf einzelne Arten und Bilder eingeht. Leider sind die meisten Textpassagen in der Ich-Form verfasst. Der Leser gerät da leicht in Verwirrung, denn nirgendwo – auch nicht im Anhang – wird deutlich, wer nun eigentlich was erlebt, fotografiert und beschrieben hat. Selbst im von beiden Bildautoren unterzeichneten Vorwort wird die Ich-Form verwendet.

Dieses Ärgernis wird jedoch mehr als ausgeglichen durch das bestechende Bildmaterial und die vielen einfühlsamen Naturschilderungen. Ein Genuss für alle, die im »Buch der Natur« hin und wieder einfach nur blättern wollen, um still zu betrachten, anstatt nach dem Zähl- und Messbaren zu fahnden.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist in Celle.



MUSIKTHEORIE

Guerino Mazzola

The Topos of Music

Geometric Logic of Concepts, Theory, and Performance

Birkhäuser, Basel 2002. 1368 Seiten + CD, € 128,–

Der Züricher Mathematiker Guerino Mazzola hat in den 1980er Jahren neue, vor allem algebraische und geometrische Methoden zur mathematischen Modellierung von Musik entwickelt. Sein 1990 erschienenes Buch »Geometrie der Töne« (Spektrum der Wissenschaft 9/1992, S. 130) gibt eine einführende Darstellung mit ersten Resultaten. Ursprünglich wollten Autor und Verlag dieses Werk nur ins Englische übersetzen und damit die Musiktheorie des Autors der internationalen Öffentlichkeit zugänglich machen.

Diese Forschungsrichtung nahm jedoch in den letzten zehn Jahren einen gewaltigen Aufschwung. Methoden aus Logik und Semiotik kamen hinzu, der Computer avancierte zum viel verwendeten Experimentiergerät, Forschungsgruppen in der Schweiz, Deutschland, Frankreich, Italien und Mexiko entstanden und kooperieren auf vielfältige Weise. Aus der anfangs geplanten Übersetzung wurde ein Kompendium mit weit über tausend Seiten, 17 Teilen und fast 70 Kapiteln, nahezu 600 Literaturverweisen und einer umfangreichen CD-Rom mit Programmen.

Das Buch behandelt eine immense Fülle an Themen, von der sehr detaillierten Darstellung der mathematischen Theorie über deren Anwendung auf zentrale Fragen der Musikwissenschaft bis zur Umsetzung der bereitgestellten Methoden in Computerprogramme. Dabei verfolgt der Autor das höchst anspruchsvolle Ziel, alle diese Gesichtspunkte einem zentralen Prinzip unterzuordnen, das er mit dem griechischen Wort »Topos« (Ort) beschreibt. Damit bezieht er sich sowohl auf die Position, die der Musik im Gefüge der geistigen Gegenstände zuzuweisen ist, als auch auf die mathematische Struktur namens »Topos«, die im Rahmen der Kategorientheorie eine enge Verflechtung von Logik und Geometrie ermöglicht. Das gesamte musikalische Zeichensystem könne mit Hilfe dieser mathematischen Struktur beschrieben und untersucht werden: Das ist Mazzolas zentrale These, deren Begründung den Hauptteil des Buchs ausmacht. Die Doppelbedeutung seines Titels drückt den Anspruch des Werkes aus: die Zusammenführung von philosophischer Einsicht mit mathematischer Konkretheit.

Die Fülle des behandelten Materials, die Stringenz des Vorgehens und Qualität wie Quantität der Resultate belegen überzeugend den beachtlichen Erfolg dieses sehr jungen Forschungszweigs. Der Weg zu dieser Überzeugung ist jedoch für den Leser lang und qualvoll.

»The Topos of Music« ist keine Einführung in die mathematische Musiktheorie. Die Art der Darstellung ist alles andere als eingängig, und die benötigten Vorkenntnisse sind erheblich. Bereits die Theorie der Denotatoren, die der Autor mit einem als »naiv« bezeichneten Zugang einführt, erfordert große Vertrautheit mit anspruchsvollen mathematischen Strukturen, Methoden und vor allem Denkweisen; erst recht gilt das, sobald Mazzola wenige Seiten später zum allgemeinen Formalismus übergeht. Wer dieses Werk ernsthaft studiert, muss ein großes Sortiment mathematischer Kenntnisse parat haben: von den Grundlagen der Mengenlehre und Logik bis weit in die Kategorien- und Topostheorie, über vielfältige algebraische Strukturen bis hin zu Mannigfaltigkeiten, Varietäten und Schemata, den Anfängen der allgemeinen und algebraischen Topologie, Differenzialgeometrie einschließlich Vektorfeldern, dynamischen Systemen und partiellen Differenzialgleichungen. Auch für professionelle Mathematiker empfiehlt sich vor der Lektüre eine gezielte Auffrischung ihres Wissens.

Das hohe Einstiegsniveau kann man dem Autor nicht unbedingt zum Vorwurf machen. Ein Lehrbuch der Quantenmechanik beginnt typischerweise auch mit der Axiomatik, ohne sich mit Motivationen oder historischen Bemerkungen aufzuhalten, und setzt Kenntnisse über Hilbert-Räume und Ähnliches schlicht voraus. Nur gibt es zur Quantenmechanik ausreichend Bücher, die diese Lücken überbrücken. Zu Mazzolas mathematischer Musiktheorie steht dagegen nur die «Geometrie der Töne« zur Verfügung; zur Topostheorie gibt es et-

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Georg Schwedt

Noch mehr Experimente mit Supermarktprodukten

Wiley-VCH, Weinheim 2003, 248 Seiten, € 29,90

Der Blickwinkel, unter dem wir diesmal unseren Einkaufswagen durch die Regalreihen schieben und die vielfältige Produktpalette beäugen, ist ein anderer als bei Schwedts erstem Band »Experimente mit Supermarktprodukten«. Standen dort die Waren im Vordergrund und bestimmten den Aufbau des Buchs, so rangiert hier die Chemie an erster Stelle – wie der Buchuntertitel »Das Periodensystem als Wegweiser« schon verrät.

Schwedt ergänzt die relativ trockenen Versuchsvorschriften immer wieder durch thematisch passende, kurzweilige Anekdoten, liefert viele historische Hintergrundinformationen und illustriert das Buch zusätzlich mit zahlreichen Abbildungen alter Apparaturen.

Aus der Rezension von Elisabeth Addicks

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■
Didaktik	■■■
Suchen/Finden	■■■■■
Lesespaß	■■■
Preis/Leistung	■■
Gesamtpunktzahl	17

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter **http://www.wissenschaft-online.de/5x5**

liche Einführungen, die allerdings meist sehr spezielle Ziele verfolgen.

Ist Musik wirklich so komplex, dass sie diesen monumentalen theoretischen Apparat erfordert? Mazzola ist davon überzeugt. Komponisten wie Bach, Haydn, Mozart oder Beethoven waren Genies, und um ihren Meisterwerken gerecht zu werden, seien in Tiefe und Leistungsfähigkeit angemessene Modelle unumgänglich. Das Universum, »Gottes Meisterwerk«, erfordere zu seinem Verständnis auch nicht gerade wenig an Wissenschaft. Nur hat Mazzola sein theoretisches Instrumentarium sehr großzügig angelegt, ohne dass zu erkennen wäre, wozu die so geschaffene, kaum überschaubare Breite und Vielfalt nötig oder nützlich ist.

Einem bestimmten – nicht gerade kleinen – Personenkreis rät Mazzola rundweg von der Lektüre ab, nämlich denjenigen, die »darauf bestehen, dass Präzision und Schönheit einander ausschließen und dass Mathematik nur Tautologien produziere und deshalb zu substanziellem Wissen nichts beitragen könne«. Schon richtig, dieses Buch ist nichts für Ignoranten; aber Mazzolas mathematische Musiktheorie wird nur dann eine Breitenwirkung erzielen, wenn es ihr gelingt, diese Ignoranzbarriere zu durchbrechen. »The Topos of Music« leistet dazu leider nur einen bescheidenen Beitrag.

Andreas Nestke

Der Rezensent ist promovierter Mathematiker und lehrt Mathematik an Fachhochschulen in Berlin.



MATHEMATIK

Robert und Ellen Kaplan

Das Unendliche denken

Eine Verführung zur Mathematik

Aus dem Amerikanischen von Hainer Kober.
Econ, München 2003. 412 Seiten, € 25,–

Einige der erfolgreichsten Mathematik-Bücher der letzten Jahre sind einzelnen Zahlen gewidmet: der Kreiszahl π, der Basis der natürlichen Logarithmen e oder auch der Null. Ihr Hauptthema – die jeweilige Zahl – hält viele historische und kulturelle Bezüge und allerlei Einzelheiten, die auch Mathematikern nicht immer bekannt sind, gut zusammen, ohne dass die Autoren allzu sehr ins mathematische Detail gehen müssen. Damit heben sich diese »Zahlenbücher« wohltuend von älteren Mathematikbüchern für Laien ab, die vor allem das erklären, was die Mathematiker traditionell für wichtig erachten – mit dem Effekt, dass sie den bewährten Kanon aus Geometrie, Algebra und Kombinatorik wiedergeben und sich im Inhalt kaum voneinander unterscheiden.

Robert Kaplan, der mit einem Buch über die Null vor drei Jahren einen großen Erfolg feierte, hat nun zusammen mit seiner Frau Ellen ein Buch über das Unendliche geschrieben. In seinem Stil ist es den Zahlenbüchern ähnlich; aber insgesamt gehört es doch eher zur zweiten Kategorie der traditionellen Bücher.

In den ersten vier Kapiteln erklärt das Ehepaar die natürlichen, rationalen, irrationalen und komplexen Zahlen, die Gruppen- und Körperaxiome, Eigenschaften der Primzahlen sowie Folgen und Reihen. Es folgen Themen aus der Geometrie – unter anderem die Konstruktion der Mittelpunkte von In- und Umkreis bei Dreiecken. Der Weg führt weiter über die Konstruierbarkeit von gleichmäßigen n-Ecken zur komplexen Zahlenebene und der projektiven Geometrie. Das Schlusskapitel ist dem abzählbar und überabzählbar Unendlichen sowie den Ordinal- und Kardinalzahlen gewidmet.

Wer einige der Begriffe in dieser Aufzählung nicht kennt, wird das Buch mit Gewinn lesen können. Man spürt auf jeder Seite die Begeisterung der Autoren. Das rüstige Ehepaar – er ist Jahrgang 1933, sie 1936 – hat Übung darin, mathematische Ideen zu vermitteln: Vor neun Jahren gründeten die beiden in Cambridge (Massachusetts) einen Mathematik-Zirkel, der vor allem unter Kindern und Jugendlichen beliebt ist.

Die Autoren schrecken auch vor Beweisen nicht zurück, sodass die Leser gelegentlich die Chance haben, ein wenig in die Tiefe zu gehen und die vorgestellten Theorien in ihrem Kern zu verstehen. Einige längere Beweise stehen in dem ▷



Leonhard Euler (1707–1783), Vater von dreizehn Kindern und auch in der Mathematik von unerschöpflicher Fruchtbarkeit

ausführlichen Anhang am Ende des Buchs, andere finden sich auf einer (englischsprachigen) Internetseite der Autoren.

Nur über das eigentliche Thema des Buchs lernt man wenig. Zwar taucht in jedem Kapitel das Unendliche auf – es gibt unendlich viele Primzahlen, zwischen zwei beliebigen rationalen Zahlen liegen immer unendlich viele andere, in der projektiven Geometrie werden »unendlich ferne Punkte« eingeführt. Man bekommt den – zutreffenden – Eindruck, dass das Unendliche praktisch überall in der Mathematik auftaucht und viele Gesichter hat.

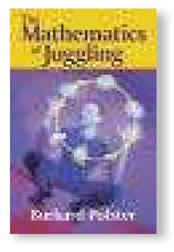
Aber es gelingt den Autoren nicht, diese Bruchstücke zu einem einheitlichen Bild zusammenzufügen. Sie erzählen zwar viele Anekdoten und machen philosophische Anmerkungen, auch versuchen sie in drei über das Buch verteilten »Zwischenspielen«, immer wieder zum Hauptthema zurückzufinden. Aber sie bringen über 150 bedeutende Mathematiker, Schriftsteller, Komponisten und Politiker ins Spiel, wodurch ihr Text unvermeidlich an der Oberfläche bleibt. Viele Anspielungen setzen beim Leser eine recht hohe literarische Bildung voraus, andere scheinen ins Leere zu gehen. Was lernt man daraus, dass bei der Erklärung der Körperaxiome die Addition und die Multiplikation mit Romulus und Remus verglichen werden, da sie gemeinsam vom Distributivgesetz »gesäugt« werden, aber dennoch »unabhängig« sind? Es wimmelt von solchen Stilblüten.

Was das Buch interessant macht, sind deshalb vor allem die mathematischen Inhalte. So legen die Autoren großen Wert auf die elementare Geometrie, die in der Schule eine immer geringere Rolle spielt, aber mit ihren anschaulichen Beweisen einen guten Einstieg in das mathematische Denken gibt. Ebenso lesenswert ist das Kapitel über das Zusammenspiel von Geometrie und Algebra bei der Frage, welche geometrischen Objekte (wie n-Ecke) mit Lineal und Zirkel konstruierbar sind.

Mittlerweile gibt es eine große Nachfrage nach Mathematikbüchern für Schüler, die über den Tellerrand der Schulmathematik schauen möchten. Diese Bücher werden gern als Prämien und Geschenke nach Mathematik-Wettbewerben verteilt. Hier könnten Robert und Ellen Kaplan ihre Leser finden. Aber die in den letzten Jahren erschienenen Bücher von Ian Stewart, Keith Devlin und William Dunham sind besser.

Vasco Alexander Schmidt

Der Rezensent ist Mathematiker und promovierter Linguist; er arbeitet als technischer Redakteur und Wissenschaftsjournalist in Walldorf.



ANGEWANDTE MATHEMATIK

Burkard Polster

The Mathematics of Juggling

Springer, New York 2003. 226 Seiten, $ 39,95

Burkard Polster arbeitet als Mathematiker in Australien und ist selber Jongleur. Der Schwerpunkt des Buchs liegt allerdings deutlich auf der mathematischen Seite.

Ausgehend vom einfachen Jonglieren mit einer Hand über *multiplex* (gleichzeitiges Fangen oder Werfen mehrerer Bälle) geht Polster erst auf Seite 85 zum eigentlichen Jonglieren mit zwei oder mehr Händen *(multihand juggling)* über; ab zwei Jongleuren heißt das dann *passing*. Die Jongliermuster werden durch Zahlenfolgen *(site swaps)* beschrieben; dabei bleibt unberücksichtigt, ob der Ball trickreich unter dem Bein oder hinter dem Rücken geworfen wird. Die Zahlen geben die Flugdauer des Wurfs an; zum Beispiel kommt bei dem *site swap* 534 der erste Ball nach fünf Takten, der zweite nach drei und der dritte nach vier Takten an. Dadurch tauschen die ersten beiden Bälle die Reihenfolge. Der Autor leitet Algorithmen her, mit denen man feststellen kann, ob eine Zahlenfolge jonglierbar ist oder nicht. Zu gegebener Periode und maximaler Wurfhöhe kann man sämtliche jonglierbaren Muster aufzählen und auch bestimmen, mit welchen Würfen man den Übergang von einem zu einem anderen Muster schafft.

Auf Seite 117 erreicht Polster endlich *practical juggling*, aber die als Beispiele verwendeten Muster sind entweder praktisch unmöglich oder trivial. Das vorausgesetzte mathematische Niveau schwankt stark und ist über weite Strecken ziemlich hoch. Meine vier Semester höhere Mathematik für Ingenieure brachten keinen Vorteil gegenüber dem Schulwissen. Neben ein paar Flüchtigkeitsfehlern fallen auch Inkonsistenzen auf: An mehreren Stellen wechseln die Bezeichnungen von wesentlichen Variablen. Bis Seite 85 bedeutet h die Höhe der Würfe, danach die Anzahl der Hände.

Es folgen knapp vierzig Seiten über *bell ringing*. Die Kunst, Kirchenglocken so zu läuten, dass jede Reihenfolge genau einmal vorkommt, hat Tradition im Commonwealth. Der Bezug zum Jonglieren ist allerdings gering.

Dieses Buch bietet einen guten Überblick über die Jongliertheorie. Wer sich allerdings schon etwas damit beschäftigt hat, dem bietet es nicht viel Neues für das Jonglieren in der Praxis. Wer sich von affinen Weyl-Gruppen, Galois-Funktionen und Möbius-Inversionen nicht abschrecken lässt, möge das Werk mit Gewinn durcharbeiten.

Werner Riebesel

Der Rezensent hat Maschinenbau studiert, ist derzeit Konstrukteur im Bereich Luftfahrtantriebe und betätigt sich seit 14 Jahren als aktiver und theoretischer Jongleur.



ARCHÄOLOGIE

Dieter Hertel

Die Mauern von Troia

Mythos und Geschichte im antiken Ilion

C. H. Beck, München 2003. 420 Seiten, € 98,–

Der Troianische Krieg dauert an«, war jüngst im Feuilleton der »Welt« zu lesen. Anlass war das Erscheinen des zweiten Buchs von Dieter Hertel, Privatdozent für Klassische Archäologie an der Universität zu Köln. Offenbar gehört er zu der Phalanx von Historikern, Philologen und Archäologen, die gegen den Leiter der Ausgrabungen in Troia, Manfred Korfmann, zu Felde ziehen. Der Ur- und Frühgeschichtler von der Universität Tübingen steht mit seiner Person für eine Deutung der bisherigen Funde, die seinen Kritikern maßlos übertrieben scheint.

Kurz zusammengefasst klingt sie so: Troia sei im 2. Jahrtausend v. Chr. eine Metropole des anatolischen Kulturkreises gewesen, die von ihrer strategisch günstigen Lage an der Kreuzung diverser Handelsrouten zu Lande und zur See profitiert habe. In einem Krieg mit mykenischen Fürsten um 1200 v. Chr. zerstört, verfielen Akropolis und Siedlung und wurden um 950 v. Chr. ganz verlassen. Etwa 200 Jahre später besiedelten griechische Kolonisten erneut die Region. Das Wissen um den gewonnenen Krieg sei aber dank des strengen Versmaßes in der mykenischen Dichtkunst mündlich über Jahrhunderte tradiert worden, bis Homer um 720 v. Chr. im Angesicht der Ruinen Troias und mit diesem Kern von Versen die »Ilias« formulierte.

Die Gegenposition lautet: Es hat nie viel mehr als den Burgberg von Hisarlık gegeben, jedenfalls keinen mächtigen anatolischen Stadtstaat. Die Ilias ist reine Dichtung. Diese Position vertritt auch Dieter Hertel. In seiner Habilitationsschrift war er 1993 dem Mythos Troia nachgegangen, hat die archäologischen Funde neu bewertet und schriftliche Quellen herangezogen. Er hat nicht nur selbst in Troia gearbeitet, sondern auch Notizen und Berichte der ersten Ausgräber Wilhelm Dörpfeld (1853–1940) und Carl Blegen (1911–1971) sowie eine Dissertation über Heinrich Schliemann (1822–1890) ausgewertet. Bei C. H. Beck erschien 2001 ein darauf basierendes Taschenbuch (»Troia. Archäologie – Geschichte – Mythos«) und nun das größere Werk.

Die Existenz der Person Homer zweifelt Hertel nicht an, wohl aber die Deutung der Ilias als Zeitzeugnis. Zum Beispiel argumentiert er, eine vor wenigen Jahren wiederentdeckte Anlage mit in den Fels getriebenen, Quellwasser führenden Stollen sei keinesfalls der Waschplatz mit zwei Brunnen, den Hektor und Achill nach Homers Dichtung während ihres Duells erreichten – eine Passage, die Korfmann gern zitiert. Der Dichter erwähne nämlich, so Hertel, eine warme Quelle, die in Troia nicht nachweisbar sei, andererseits berichte er nicht, dass die Waschgruben von Menschenhand geschaffen seien. Im Bestreben, die Dichtung auf andere Säulen zu stellen, mutmaßt Hertel sodann, Homer habe sich vielleicht von den geografischen Verhältnissen im Ida-Gebirge inspirieren lassen. Dort entspringt der Troia passierende Fluss Skamander aus mehreren Quellen, darunter einer warmen.

Warum diese Deutung die Gegebenheiten besser erklären soll, hat sich mir nicht erschlossen. Immerhin ist jenes Gebirge fünfzig Kilometer entfernt. Könnte sich Homer nicht auch von den Schlämmgruben der alten Quellhöhle die Inspiration geholt haben, um sein Szenario des Duells auszuschmücken?

Zu Beginn des zweiten Großkapitels »Das griechische, hellenistische und kaiserzeitliche Ilion als Erinnerungsort an die mythische Zeit« startet Hertel seine schärfste Attacke: Die kulturelle Einordnung der Siedlungsschicht Troia VII b 3 – der letzten vor Homer – sei schlicht falsch. So sprächen beispielsweise Funde griechischer Keramiken für eine deutlich frühere Kolonisierung. Dass die in Troia grabenden Archäologen solche Funde als Zeugnis für Handel mit dem griechischen Festland diskutieren, erwähnt Hertel nicht. Seines Erachtens spricht alles dafür, dass die Siedlung ▷



Südlicher Rest der Außenschale der Rundbastion (Steinlage aus großen Blöcken auf kleinsteinigem Fundament in der unteren Ecke ganz rechts) aus der Zeit um 400 v. Chr. Das Foto wurde während der Grabungen von Wilhelm Dörpfeld 1893/1894 aufgenommen.

Troia VIII schon im späten 11. Jahrhundert entstand und bis 900 v. Chr. nach und nach griechisch wurde. Ein langsamer Übergang der kulturellen Zugehörigkeit aber bedeutet: Den Troianischen Krieg hat es nie gegeben.

Doch woher stammt dann die Mär von Kampf und Heldentum? Hertel wagt sich nun seinerseits auf das Terrain der Deutung und zeigt Korfmann, was eine Harke ist: Er führt die Sage im Wesentlichen auf die antike Burgmauer zurück. Sie stammte schon aus der Phase Troia VI (1700–1250 v. Chr.), die frühen griechischen Siedler hätten sie also bereits vorgefunden und in ihre Niederlassung integriert. Zwangsläufig seien Mythen um die Mauer entstanden, um ihre Existenz zu erklären. Denn in Gesellschaften mit mündlicher Überlieferung würden historische Ereignisse allenfalls neunzig Jahre lang unverändert bewahrt; das Wissen um die wahre Entstehung von Troia VIII sei also längst verschwunden gewesen. Klar war den Nachkommen der Kolonisten: Nicht-Griechen hatten die Wehr errichtet, und sie war offenbar unzerstört. Dieser Widerspruch soll Vorstellungen von langwieriger Belagerung und listenreicher Eroberung hervorgebracht haben. Odysseus als Artefakt einer nichtschriftlichen Überlieferung! So viel Deutungsfantasie ist eindrucksvoll.

Ist die Ilias am Ende entstanden, um die Existenz einer Mauer zu erklären?

Immerhin bieten die letzten, von aktuellen Streitigkeiten unbelasteten hundert Seiten eine Fülle historischer Informationen über die Rolle Ilions im Kontext der hellenistischen und später der römischen Welt. Das Buch wendet sich allerdings in Sprache und Machart nur an Fachkollegen, für den Laien ist der Stoff kaum zu verdauen. Das verdeutlicht einen wenig beachteten Aspekt des neuen Streits um Troia: Auf dem Prüfstand steht auch eine junge Archäologie, die Publikumsmedien nicht scheut und dazu eine für Laien verständliche Sprache verwendet. Die zahlreichen Archäologen, denen das zu weit geht, werden Trost in Dieter Hertels Habilitationsschrift finden.

Klaus-Dieter Linsmeier

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

PREISRÄTSEL

Jans Kalkuhlation

Von Pierre Tougne

Jan kennt seine Kühe. Er weiß, dass 25 seiner Kühe in vier Tagen eine Weide von 20 Ar kahl fressen, während für 27 Tiere eine Weide von 24 Ar fünf Tage reicht.

Wenn er die Herde auf eine Weide treibt, hat das Gras stets die gleiche Höhe. Außerdem wächst das Gras auf seinen Weiden stetig und mit konstanter Geschwindigkeit nach.

Wie groß muss eine Weide sein, auf der 100 Kühe 16 Tage grasen können?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Spiele »Braintwister«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 16. März 2004, eingehen.

Lösung zu »Eine Frage des Alters« (Januar 2004)

Von Karl erfährt man das Alter aus dem Dialog zuverlässig. Er ist 17 Jahre alt. Pia hingegen könnte drei, sieben oder 21 Jahre alt sein.

Karl sagte: »Wärst du doppelt so alt wie ich und noch siebzehn Jahre älter, dann wäre mein Alter ein ganzzahliger Teiler deines Alters.« Thomas Günther aus Großenkneten übersetzte das in die Gleichung

$$2k + 17 = nk\,.$$

Dabei ist k das Alter von Karl, und sowohl n als auch k sind natürliche Zahlen. Aufgelöst nach k ergibt sich

$$k = 17/(n-2).$$

Da 17 eine Primzahl ist, kommen als Teiler nur 1 und 17 in Frage. Weil zudem Karl älter als 1 Jahr ist, entfällt $n = 19$. Damit ist $n = 3$ die einzige Möglichkeit, die Gleichung zu erfüllen. Karls Alter beträgt also 17 Jahre.

Mit diesem Wissen folgt aus Pias Aussage »mein Alter würde deines teilen, wenn du vier Jahre älter wärst« die Gleichung

$$17 + 4 = mp$$

(p ist das Alter von Pia, m und p sind natürliche Zahlen). Daraus folgt

$$p = 21/m\,.$$

Als Lösung für m kommen 1, 3, 7 und 21 in Frage. Da auch Pia älter als ein Jahr sein muss, kann sie entweder drei, sieben oder 21 Jahre alt sein.

Die Gewinner der drei schwebenden Kugelschreiber »U.F.O. Pen« sind Brigitte Holzer, St. Wendel; Peter Day, Pulheim; und Sabine Baumann, Köln.

Erratum

Bei den Lösungen des Jubiläumsrätsels haben wir im Januarheft versehentlich eine veraltete Version für das September-Rätsel abgedruckt. Die richtige Lösung finden Sie im Bild rechts. Bei der Konstruktion der Lösungstexte und daher auch bei der Ermittlung der Gewinner lag die korrekte, im Septemberheft abgedruckte Version des Rätsels zu Grunde. Es ist also alles mit rechten Dingen zugegangen.

		P		L			F			B					S	
	P	O	L	Y	M	E	R	A	S	E	H	T	M	L	C	
P	O	L	Y	N	O	M	I	W	A	R	E	I	S	C	H	
	L	Y	S	E	R	G	S	A	E	U	R	E	T	D	M	
L	Y	S	I	N	B	A	E	C	K	E	R	R	A	B	E	
	T	I	N	N	I	T	U	S	U	H	M	E	T	R	I	K
P	O	L	Y	E	D	E	R	D	L	R	A	B	I	E	S	
	P	A	T	R	I	C	I	A	A	P	N	A	S	H	S	
K	A	N	T	E	T	A	S	T	R	U	N	K	T	M	F	
	L	U	R	I	A	H	O	E	R	N	E	R	I	A	L	
	L	E	I	D	E	N	M	I	N	K	O	W	S	K	I	
G	E	M	U	E	T	E	E	G	S	T	R	E	C	K	E	
	L	I	M	N	A	N	R	E	G	U	N	G	H	U	G	O
		L									A				E	

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Perfekte magische Würfel

Für die Verallgemeinerung der magischen Quadrate gibt es aufregende Neuigkeiten. In deutsch-französischer Zusammenarbeit entdeckten ein Lehrer und ein Software-Entwickler einen perfekten magischen Würfel der Ordnung 5 – und mehr.

Von Christoph Pöppe

Wir leben in bewegten Zeiten. Mathematische Entdeckungen purzeln in derart rascher Folge aus dem Computer, dass die Entdecker kaum Zeit finden, sie aufzuschreiben. Noch in der Septembernummer 2003 unserer Schwesterzeitschrift »Pour la Science« erscheint ein Artikel, in dem die Existenz perfekter magischer Würfel der Ordnungen 5 und 6 als ungeklärt dargestellt wird. Aber sein Autor Christian Boyer, Software-Entwickler aus Enghien-les-Bains bei Paris, hat sich bereits im Frühjahr desselben Jahres mit dem Nürnberger Gymnasiallehrer Walter Trump zusammengetan, um nach ebensolchen Würfeln zu forschen. Just am 1. September programmiert Trump, der am Gymnasium Stein Mathematik und Physik unterrichtet, seinen Computer, sich auf die aufwändige Suche nach perfekten magischen Würfeln der Ordnung 6 zu begeben – und ist völlig verblüfft, dass der noch selbigen Tages einen findet!

Damit nicht genug. Bereits am 13. November trägt die gemeinsame Anstrengung von Trump und Boyer eine weitere Frucht, die so prachtvoll ist, dass sie alsbald ihren Weg in die Tagespresse findet: den ersten perfekten magischen Würfel der Ordnung 5 (Bild rechts oben). Und mitten in die Vorbereitungen zu diesem Artikel platzt am 4. Januar dieses Jahres die Nachricht, dass Trump einen fast perfekten magischen Würfel der Ordnung 4 gefunden hat (Bild S. 110). Ganz perfekt ist er nicht – man weiß, dass das unmöglich ist –, aber sein Grad an Perfektion ist bisher unübertroffen.

Magische Würfel sind die voluminösen und kapriziösen Verwandten der magischen Quadrate, jener quadratischen Anordnungen von Zahlen, deren Summe über jede Zeile, Spalte und Diagonale den gleichen Wert – die »magische Konstante« des Quadrats – hat. In der Regel wird von einem magischen Quadrat der Seitenlänge N verlangt, dass es genau die natürlichen Zahlen von 1 bis N^2 enthält. Manchmal lässt man die Zahlen auch von 0 bis N^2–1 laufen, was manche Argumentationen vereinfacht und keinen wesentlichen Unterschied macht: Wenn man zu jeder Zahl eines magischen Quadrats eine Konstante, zum Beispiel 1 oder –1, addiert, ist es so magisch wie zuvor.

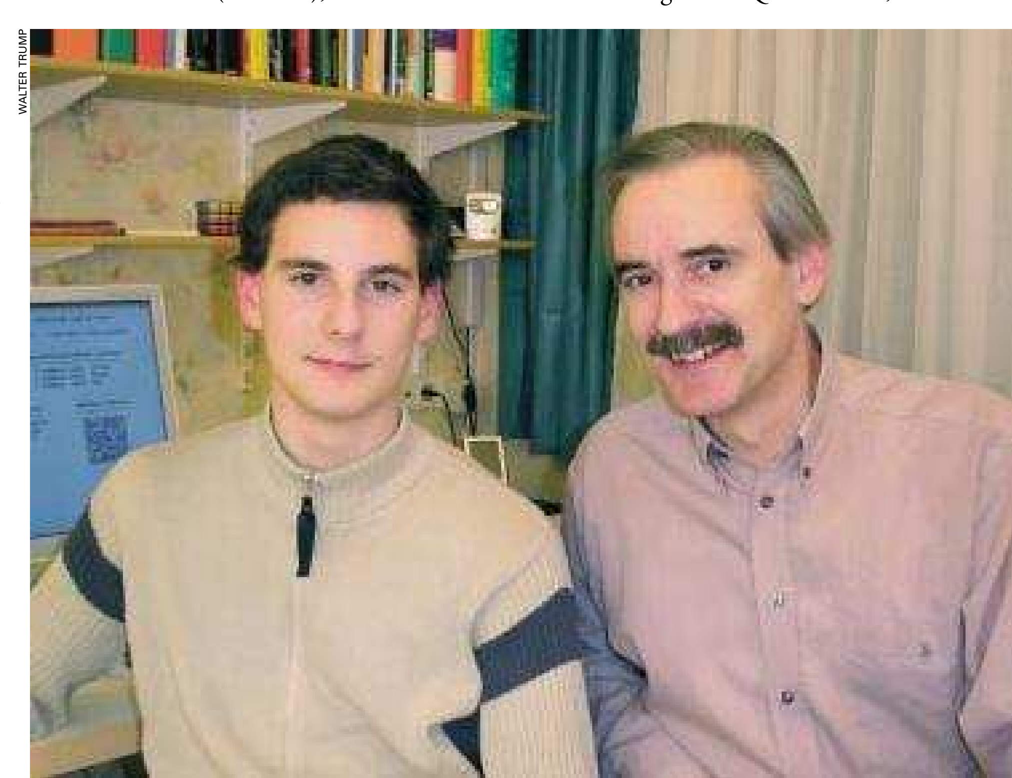
Ein magischer Würfel ist die Verallgemeinerung eines magischen Quadrats auf drei Dimensionen: Man baut einen Würfel aus $N \times N \times N$ kleinen würfelförmigen Klötzchen zusammen. Jedes der Klötzchen trägt eine der Zahlen von 1 bis N^3 (oder von 0 bis N^3-1), und im Prinzip sollte immer dann, wenn N Klötzchen im Würfel auf einer geraden Linie liegen, deren Summe gleich der magischen Konstante sein. Solche geraden Linien verlaufen von links nach rechts (»Zeilen«), von vorn nach hinten (»Spalten«) oder von unten nach oben (»Säulen«); dazu kommen die »kleinen« Diagonalen, die parallel zu einer Flächendiagonale verlaufen, sowie die vier »großen« oder Raumdiagonalen, die jeweils einander gegenüberliegende Eckpunkte verbinden.

Es stellt sich heraus, dass alle diese Forderungen zusammen sehr schwierig zu erfüllen sind. Wenn wirklich alle Summen die magische Konstante ergeben, nennt man den Würfel »perfekt magisch«, während man die Qualitätsbezeichnung »magisch« bereits denjenigen Würfeln zugesteht, bei denen nicht alle kleinen Diagonalen den richtigen Wert haben. Manche Autoren verwenden andere Bezeichnungen.

Die magische Konstante eines Würfels, der aus den Zahlen 1 bis N^3 besteht, muss gleich $N(N^3+1)/2$ sein, denn es gibt N^2 Säulen, deren Summe jeweils gleich der magischen Konstante ist, und zusammen müssen diese Summen gleich der Summe aller Klötzchenzahlen sein; das aber ist die Summe aller Zahlen von 1 bis N^3, und die hat den Wert $N^3\,(N^3+1)/2$. Für einen magischen Würfel der Ordnung 5 ergibt sich die magische Konstante $5 \times 63 = 315$.

Die Gleichungen der Perfektion

Wie viele Bedingungen muss ein Würfel erfüllen, damit er perfekt magisch ist? Es gibt N^2 Säulen und ebenso viele Zeilen und Spalten; das ergibt zusammen $3N^2$ Bedingungen. Man kann den großen Würfel auf drei verschiedene Weisen in Scheiben der Dicke 1 zerlegen. Für einen perfekten Würfel muss jede dieser N Scheiben ein magisches Quadrat sein,



WALTER TRUMP

Walter Trump, Gymnasiallehrer in Nürnberg, und sein Sohn Daniel, auf dessen Computer der erste perfekte magische Würfel der Ordnung 5 gefunden wurde

insbesondere müssen ihre beiden Diagonalen den richtigen Wert ergeben. Das macht zusammen $3 \times 2 \times N = 6N$ kleine Diagonalen; am Ende kommen noch die vier großen Diagonalen dazu. Also haben die N^3 Zahlen im Würfel insgesamt $3N^2 + 6N + 4$ Bedingungen zu erfüllen. Im Falle $N = 5$ sind das 109 Bedingungen für 125 Zahlen, oder eben 109 (lineare) Gleichungen für 125 Unbekannte.

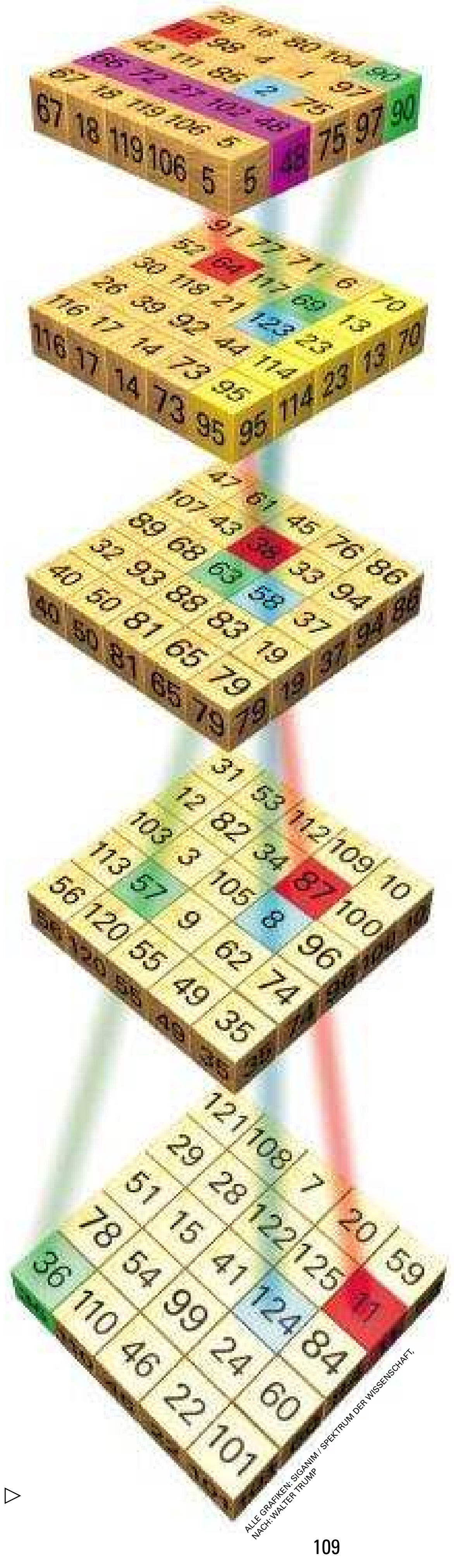
Die Schulweisheit lehrt uns: Je mehr Unbekannte, desto mühsamer ist es, das dichte Geflecht ihrer Beziehungen, sprich der Gleichungen zu entwirren. Aber wenn es mehr Gleichungen sind als Unbekannte, dann ist das System im Allgemeinen überbestimmt und damit gänzlich unlösbar. Demnach sieht es für $N = 5$ ganz gut aus, denn es sind deutlich weniger Gleichungen als Unbekannte. Dagegen hätten für $N = 4$ nur 64 Unbekannte 76 Gleichungen zu erfüllen – zu viele, selbst wenn man berücksichtigt, dass einige dieser 76 Gleichungen entbehrlich sind, da sie schon durch andere ausgedrückt werden.

Diese Überlegungen sind irreführend, denn sie ignorieren den härtesten Teil des Problems: Die Unbekannten müssen nicht nur die Gleichungen erfüllen, sondern voneinander verschieden und sämtlich ganze Zahlen zwischen 1 und N^3 sein. Aber der allgemeine Schluss aus der Schulweisheit bleibt gültig: Je größer der Würfel, desto eher sind magische Eigenschaften erfüllbar. Allerdings wächst auch die Zahl der zu erwägenden Möglichkeiten ins Unermessliche.

Perfekte magische Würfel der Ordnungen 4 und kleiner gibt es nicht. Für die Ordnung 3 gibt es im Wesentlichen vier einfach-magische Würfel (ohne Bedingungen an die kleinen Diagonalen), für die Ordnung 4 bereits schätzungsweise mehrere Billionen. Für die Ordnung 7 gibt es sogar ein konstruktives Verfahren, einen perfekt magischen Würfel zu finden. Der englische Missionar Andrew H. Frost hat es 1866 veröffentlicht.

Es handelt sich um eine Verallgemeinerung des Verfahrens, mit dem der berühmte Leonhard Euler (1707–1783) seine griechisch-lateinischen Quadrate und daraus magische Quadrate konstruierte (Spektrum der Wissenschaft 1/1996, S. 14). Ein lateinisches Quadrat enthält nur die Zahlen von 1 bis N; jede von ihnen kommt N-fach vor, aber nur einmal in jeder Zeile, Spalte und Diagonale. Ein griechisches Quadrat ist im Wesentlichen dasselbe, nur mit den Zahlen 0, N, $2N$, …, $(N–1)N$. Jedes dieser Quadrate ist bereits magisch, also ergibt sich wieder ein magisches Quadrat, wenn man sie Feld für Feld addiert. Und wenn die beiden Komponenten sehr verschieden gebaut sind, kommt in der Summe jede Zahl zwischen 0 und $N^2–1$ genau einmal vor. Andrew Frost addierte drei hinreichend verschiedene Würfel der Ordnung 7: einen lateinischen, einen griechischen und einen mit den Vielfachen von $N^2 = 49$.

Leider gibt es für kleinere Ordnungen als 7 keine drei hinreichend verschiedenen lateinischen, griechischen, … Würfel. Deswegen war die Fachwelt allgemein davon überzeugt, dass so kleine perfekte magische Würfel überhaupt nicht existieren – bis Trump und Boyer jüngst das Gegenteil bewiesen.



Dieser Würfel aus 5×5×5 Zahlenklötzchen ist der erste perfekte magische Würfel der Ordnung 5: Die Summe der Zahlen entlang jeder Zeile (eine Beispielzeile ist violett eingefärbt), Spalte (gelb), Säule (hellblau), kleinen Diagonale (rot) und großen Diagonale (grün) ist gleich der magischen Konstante 315.

Der Computer sucht – mit viel Nachhilfe

Das gelang ihnen nicht, indem sie ein neues konstruktives Verfahren fanden, sondern durch Probieren. Nicht die stumpfsinnige Form natürlich; denn die Zahlen von 1 bis 125 irgendwie auf die Plätze des 5×5×5-Würfels zu verteilen und nachzusehen, ob Zeilen-, Spalten-, Säulen- und Diagonalensummen den richtigen Wert haben, ist aussichtslos.

Das Zauberwort heißt »Backtracking«: Man – genauer: der Computer – fülle versuchsweise einen Platz nach dem anderen mit einer Zahl aus dem Vorrat. Sowie aus einer Fünferreihe vier Plätze besetzt sind, ist der Wert des fünften erzwungen. Wenn diese Zahl nicht kleiner als 1, nicht größer als 125 und noch verfügbar ist, setze man sie ein. Das füllt möglicherweise den vierten Platz einer anderen Fünferreihe, wodurch eine weitere Belegung erzwungen wird, und so weiter. Wenn eine erzwungene Zahl zu groß, zu klein oder schon vergeben ist, fange man nicht wieder ganz von vorne mit Probieren an. Vielmehr vollführe ▷



Dieser von Trump entdeckte magische Würfel der Ordnung 4 kommt der Perfektion so nahe wie kein anderer zuvor. Die Summe über jede Zeile, Spalte, Säule und kleine Diagonale beträgt 130; nur die großen Diagonalen weichen von dieser magischen Konstante ab, auf symmetrische Weise: 100, 120, 140 und 160.

▷ man einen geordneten Rückzug (daher der Name *backtracking*): Man widerrufe nur den letzten Schritt mit all seinen unmittelbaren Konsequenzen und probiere an dessen Stelle einen anderen. Erst wenn auf dieser Stufe alle Möglichkeiten erschöpft sind, widerrufe man auch den vorletzten Schritt und so weiter. Durch diese »Wiedereinsetzung in den vorigen Stand« muss man den Aufwand, den man bis zu diesem Stadium getrieben hat, nicht verloren geben.

Backtracking allein senkt allerdings den Aufwand noch nicht auf eine erträgliche Größe. Man muss obendrein die Würfelchen in der richtigen Reihenfolge mit Probierzahlen besetzen. Das Prinzip lautet: »Die schwierigsten Plätze zuerst.« Dabei ist ein Platz umso schwieriger, je mehr Linien sich in ihm treffen. In einem Eckplatz treffen sich sieben Linien (drei gerade, drei schräge und eine ganz schräge, die Raumdiagonale). Eine Besetzung dieses Platzes vermindert die Möglichkeiten für die weiteren Probierschritte – und damit den Suchaufwand – weit wirksamer als eine Festlegung an einer Stelle, die nur von den üblichen drei geraden Linien getroffen wird.

Der in diesem Sinne schwierigste Platz ist der genau in der Mitte, denn dort treffen sich volle dreizehn Linien: drei gerade, sechs schräge und vier ganz schräge. Den muss man unter allen Umständen zuerst besetzen, und das ist in diesem Fall sogar ganz einfach. Mit ein wenig Theorie kann man beweisen, dass in einem perfekten magischen Fünferwürfel auf den zentralen Platz die zentrale Zahl kommen muss, das heißt die Zahl in der Mitte der Folge von 1 bis 125: die 63.

Ein weiteres nützliches Prinzip trägt den Namen Assoziativität (auch wenn es mit dem Assoziativgesetz nichts zu tun hat). Zu jedem Platz in einem Würfel gibt es den eindeutig bestimmten Platz, der genauso weit entfernt vom Mittelpunkt des Würfels liegt wie er selbst, aber genau gegenüber. Ein magischer Würfel ist besonders symmetrisch, wenn die Zahlen auf diesen beiden Plätzen in jedem Fall komplementär sind, das heißt sich zu N^3+1 ergänzen. Ein magischer Würfel mit dieser Eigenschaft heißt assoziativ. Viele Konstruktionsverfahren für magische Quadrate und Würfel sind so gebaut, dass das Ergebnis automatisch assoziativ ist.

Für den Würfel der Ordnung 5 ist $N^3+1=126$, und der Platz im Zentrum des Würfels liegt sich selbst gegenüber; es passt also zur Assoziativität, dass dieser Platz die 63 tragen muss.

Der Weg, auf dem Trump und Boyer schließlich zum Erfolg gelangten, ist erfrischend antiautoritär: Er bestand darin, alle diese guten Ratschläge aufzugreifen – und dann einige von ihnen gezielt zu missachten. Ja, sie setzten in die Mitte die 63; es geht ja nicht anders. Sie suchten auch im Prinzip nach assoziativen Würfeln; aber sie bestanden nicht darauf, dass am Ende jedes Paar gegenüberliegender Plätze mit komplementären Zahlen gefüllt wird. Und sie besetzten nicht als Nächstes die Eckplätze oder auch nur die ebenso schwierigen restlichen Plätze auf den Raumdiagonalen.

Vielmehr umgaben sie den »harten Kern« – die 63 in der Mitte – zunächst mit einem »weichen Kern«, sprich mit einem Hilfswürfel der Größe $3\times3\times3$, der zwar nicht magisch, aber assoziativ sein musste. Insbesondere war innerhalb des weichen Kerns die Summe entlang aller dreizehn Linien durch den Mittelpunkt gleich 189. Durch zahlreiche weitere notwendige Bedingungen konnte die Anzahl der Hilfswürfel auf einige Millionen begrenzt werden – nichts, was heute noch einen PC ernsthaft schrecken könnte.

Um den weichen Kern legten sie dann, wieder mit Probieren und Backtracking, die »Schale« aus allen Würfelchen, die von außen sichtbar sind. Das sind immerhin 98 Stück im Vergleich zu den 26 des weichen Kerns. Zum Probieren ließen sie insgesamt fünf PCs teilweise rund um die Uhr laufen.

Allmählich tröpfelten Lösungen aus den Computern, bei denen 28 der 30 kleinen Diagonalen die richtige Summe hatten. Ungefähr eine von tausend so gefundenen Lösungen sollte nicht nur 28, sondern 30 richtige Diagonalen haben und damit perfekt sein; diese Abschätzung hatten Trump und Boyer aus theoretischen Überlegungen gewonnen. Nach einigen Wochen und mehr als 1500 fast perfekten Würfeln drohte sie allmählich der Mut zu verlassen. Da erzählte beiläufig Trumps zwanzigjähriger Sohn Daniel, der sich sehr für Computer, aber nicht für magische Würfel interessiert, sein PC habe eine perfekte Lösung gefunden! ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Les cubes magiques. Von Christian Boyer in: Pour la Science, September 2003, S. 90

Les premiers carrés tétra et pentamagiques. Von Christian Boyer in: Pour la Science, August 2001, S. 98

Magic cubes: new recreations. Von William H. Benson und Oswald Jacoby. Dover, New York 1981

A breakthrough in magic squares, and the first perfect magic cube. Von Martin Gardner in: Mathematical Games, Scientific American, Januar 1976, S. 118

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



JOHN GURCHE

Vorfahren der ersten Europäer?

Viel früher als lange geglaubt – vor fast zwei Millionen Jahren – lebten schon Menschen am Südrand des Kaukasus. Eine Ruinenstätte der Seidenstraße birgt ihre Überreste

WEITERE THEMEN IM APRIL

Explodierende Molekülhaufen

Mit hochintensiven Laser-Pulsen lassen sich winzige Cluster von Atomen oder Molekülen zur Explosion bringen. Dabei werden Details über den Ablauf chemischer Reaktionen offenbar

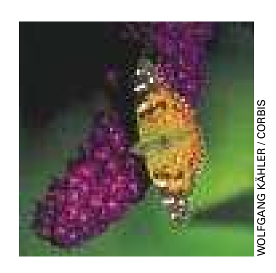
SONDERTEIL: Innovation

Wo Deutschlands Forscher Spitze sind: Flüssigkeitskristalle, programmierbare Biochips, alternative Kraftstoffe u. a.



Zu früher Frühling

Weil viele Blumen heute eher blühen als noch vor wenigen Jahrzehnten, drohen ganze Ökosysteme aus dem Takt zu geraten



WOLFGANG KÄHLER / CORBIS

GRIFF WASON

Genialer Urtaschenrechner

Die CURTA Universal Rechenmaschine war klein, mechanisch und genial. Und im Konzentrationslager Buchenwald rettete sie ihrem Erfinder Curt Herzstark das Leben



Ewig junges Milchstraßensystem

Lange hielten die Astronomen unsere Galaxis für eine alternde Diva – doch neue Forschungen zeigen, dass sie außerordentlich dynamisch ist und sich beständig erneuert



RON MILLER